

Untersuchung über die Feuerwider-  
standsdauer von Spannbetonbau-  
teilen mit nachträglichem Verbund  
bei Brandbeanspruchung

Schneider u. Dreyer

April 1971

(NRW IA 6 - 0.221.302 (685 2))

**INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT ZU BRAUNSCHWEIG**

**Prüfamt und Forschungsinstitut für Baustoffe und Bauarten**

# INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU

DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA – PROF. DR.-ING. G. REHM

## Untersuchung über die Feuerwiderstandsdauer von Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund bei Brandbeanspruchung

Bericht erstattet

von

Dipl.-Ing. U. Schneider

Dipl.-Ing. R. Dreyer

BIBLIOTHEK  
Technische Universität Braunschweig  
D-3060 Braunschweig

Die Untersuchungen wurden im Auftrage des Innenministers des Landes  
Nordrhein-Westfalen (Az.: I A 6 - 0.221.302 (685 2)) durchgeführt.

April 1971

BIBLIOTHEK  
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-30610 Braunschweig

Postsendungen:  
33 Braunschweig, Beethovenstraße 52  
Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher: (0531) 3912261

Fernschreiber: 952690 Ibsb d

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber  
an einzelne Mitarbeiter.

## Inhaltsverzeichnis

	Blatt
1. Aufgabenstellung . . . . .	4
2. Versuchsprogramm . . . . .	4
3. Versuchskörper . . . . .	6
3.1 Aufbau der Versuchskörper . . . . .	6
3.2 Betontechnologische Daten der Versuchskörper . . . . .	7
3.3 Spannglieder und Auspreßmörtel . . . . .	8
3.4 Temperaturmeßstellen in den Versuchskörpern . . . . .	9
4. Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .	9
4.1 Brandraum . . . . .	9
4.2 Beheizung . . . . .	10
4.3 Temperaturmessung . . . . .	10
4.4 Beurteilung der Versuchsbedingungen . . . . .	10
5. Versuchsergebnisse . . . . .	11
5.1 Feuchtigkeitsgehalt der Versuchskörper . . . . .	11
5.2 Allgemeine Beobachtungen während der Brandversuche . . . . .	12
5.3 Erwärmungsverhalten der Versuchskörper . . . . .	12
5.3.1 Auswertung der Meßergebnisse . . . . .	12
5.3.2 Erwärmungsverhalten der Platten . . . . .	13
5.3.3 Erwärmungsverhalten der Scheiben . . . . .	14
5.3.4 Erwärmungsverhalten der Balken . . . . .	15
5.3.5 Einfluß der Spannglieder auf das Erwärmungsverhalten der Bauteile . . . . .	17
6. Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis . . . . .	19
7. Zusammenfassung . . . . .	21
8. Literaturverzeichnis . . . . .	22

Verzeichnis der Tafeln

Tafel 1	- Plattenartige Bauteile (einseitige Beflammung) . . . . .	5
Tafel 2	- Scheibenartige Bauteile (dreiseitige Beflammung) . . . . .	5
Tafel 3	- Balkenartige Bauteile (dreiseitige Beflammung) . . . . .	6

Verzeichnis der Bilder

Bild 1	- Anordnung der Spannstähle in den Hüllrohren . . . .	23
Bild 2	- Anordnung der Spannstähle in den Hüllrohren . . . .	24

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1	- Einbau der Probekörper in den Brandraum
Anlage 2	- Temperaturmeßstellen der Spannstähle
Anlage 3a bis 3g	- Erwärmungsverhalten der Platten
Anlage 4a bis 5c	- Erwärmungsverhalten der Scheiben
Anlage 6a bis 14d	- Erwärmungsverhalten der Balken
Anlage 15a bis 15f	- Vergleich der Temperaturen in Bauteilen mit und ohne Spannglieder



## 1. Aufgabenstellung

Im Rahmen eines größeren Forschungsprogramms wurden in den Jahren 1964/66 am Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig Betonquerschnitte im Hinblick auf ihr Erwärmungsverhalten bei einer Temperaturbeanspruchung entsprechend DIN 4102, Blatt 2, Ausgabe 1965 untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß im Bereich von eingelegten Bewehrungsstäben in den Temperaturfeldern Abweichungen gegenüber den Temperaturfeldern in ungestörten Betonquerschnitten auftreten. Diese Abweichungen in den Temperaturen können im Rahmen der bauüblichen Toleranzen bei schlaff bewehrten bzw. bei mit sofortigem Verbund vorgespannten Konstruktionen näherungsweise berücksichtigt werden, indem man die Betondeckungen auf die Stahlachsen bezieht. Es liegen jedoch keine Untersuchungen darüber vor, ob ein solches Vorgehen auch bei Bauteilen mit örtlich stark konzentrierten Stahlquerschnitten - z. B. in mit nachträglichem Verbund vorgespannten Konstruktionen - zulässig ist. In dem vorliegenden Bericht wird diese Frage untersucht. Insbesondere sollen dabei der Einfluß des Spannstahlquerschnittes und die Auswirkungen des Auspreßmörtels auf den Erwärmungsvorgang ermittelt werden.

Die Abmessungen der Probekörper wurden so gewählt, daß direkte Vergleiche mit den Ergebnissen möglich waren, die in dem zuvor erwähnten Forschungsprogramm "Untersuchungen über die Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Betonbauteilen unter Brandbeanspruchung" [1] gewonnen wurden. Um vergleichbare Meßwerte über einzelne Spannverfahren zu erhalten, wurden u. a. bei gleichen Hüllrohrdurchmessern Spannglieder möglichst gleicher Querschnittsfläche, jedoch mit unterschiedlichen Drahtdurchmessern (Drahtbündel und Vollquerschnitte) untersucht.

## 2. Versuchsprogramm

In dem Programm wurden Platten, Scheiben und Balken untersucht. Die Tafeln 1 bis 3 enthalten die Abmessungen der Probekörper und Spannglieder. Da es bei den Versuchen nur auf das Erwärmungsverhalten ankam, wurden die Probekörper ohne äußere Belastung und ohne Vorspannung geprüft.

Tafel 1 Plattenartige Bauteile (einseitige Beflammung)

Flatte	Querschnitt d (cm)	Hüllrohr Ø (mm)	Spannstahl Ø (mm)	Fe (cm <sup>2</sup> )	Vergleichbare Spannverfahren in der Praxis
1	20	45	7 Ø 12,2	8,18	B. u. M
		45	1 Ø 32	8,03	nicht vergleichbar
		37	1 Ø 32	8,03	D. u. W.
		45	nur ausge- preßt	-	nicht vergleichbar
2		45	19 Ø 6	5,38	BBRV
		45	1 Ø 26	5,31	nicht vergleichbar
		32	1 Ø 26	5,31	D. u. W.
		32	nur ausge- preßt	-	nicht vergleichbar

Tafel 2 Scheibenartige Bauteile (dreiseitige Beflammung)

Scheibe	Querschnitt b x d (cm x cm)	Hüllrohr- Ø (mm)	Spannstahl- Ø (mm)	Fe (cm <sup>2</sup> )
1	12 x 50	45	19 Ø 6	5,38
2		32	1 Ø 26	5,31

Tafel 3 Balkenartige Bauteile (dreiseitige Beflammung)

Balken	Querschnitt b x d (cm x cm)	Hüllrohr- Ø (mm)	Spannstahl- Ø (mm)	Fe <sub>2</sub> (cm <sup>2</sup> )
1	20 x 40	45	7 Ø 12,2	8,18
2			1 Ø 32	8,03
3			19 Ø 6	5,38
4			1 Ø 26	5,31
5		37	1 Ø 32	8,03
6		32	1 Ø 26	5,31
7	28 x 56	45	7 Ø 12,2	8,18
8			19 Ø 6	5,38
9		32	1 Ø 26	5,31

### 3. Versuchskörper

#### 3.1 Aufbau der Versuchskörper

Alle Prüfkörper hatten eine Länge von 2,8 m und wurden über einer 4,0 m langen Brandkammer an Stahlträgern aufgehängt (Anlage 1). In den Platten wurden hintereinanderliegend je 2 x 2 - 4 Meßquerschnitte, in den übrigen Versuchskörpern analog je 2 Meßquerschnitte so angeordnet, daß ihr Abstand zu den Stirnseiten der Prüfkörper 70 bis 80 cm betrug. Außerdem erhielten diese, um eine Wärmeleitung in Längsrichtung zu verhindern, an den Stirnseiten eine 5 cm dicke Putzschicht aus "Vermiculite"-Mörtel.

Da nach [1] die Oberflächenbeschaffenheit (glatt oder rau) im Rahmen der möglichen Meßgenauigkeiten keinen Einfluß auf das Erwärmungsverhalten hat, wurde die Schalung für die Betonkörper aus sägerauhen Brettern erstellt. Eine leichte, konstruktive Bewehrung (Transportbewehrung) wurde so verlegt, daß ihr Abstand zu den Meßquerschnitten mindestens das Zehnfache ihres Durch-

messers betrug. Auf diese Weise kann nach [1] eine Beeinflussung der Meßergebnisse durch die Transportbewehrung vermieden werden.

Um zum Zeitpunkt der Versuche Aufschlüsse über die Feuchtigkeitsverteilung innerhalb der Prüfkörper zu erhalten, wurden parallel zur Herstellung der Versuchsbalken jeweils Probestücke gleicher Querschnittsabmessungen - einschließlich der Hüllrohre, jedoch ohne Spannstähle - von 50 cm Länge betoniert. In diesen Feuchtigkeits-Probekörpern wurde feines Drahtgewebe in der Art eingelegt, daß quer zur Balkenachse später Betonscheiben von rd. 5 cm Dicke abgespalten und ohne größeren Aufwand weiter unterteilt werden konnten. Die Feuchtigkeits-Probekörper wurden unmittelbar nach dem Entschalen an den Stirnseiten mit einer Wachsschicht versehen, um Feuchtigkeitsbewegungen an diesen Seiten auszuschließen, und anschließend in unmittelbarer Nähe der zugehörigen Versuchskörper in einer geschlossenen, teilklimatisierten Halle bis zum Versuchstermin gelagert.

### 3.2 Betontechnologische Daten der Versuchskörper

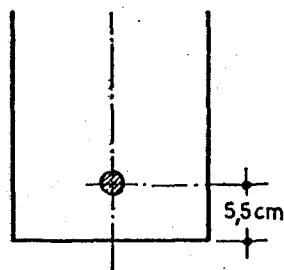
Da nach [1] die Zusammensetzung der Zuschlagstoffe - sofern es sich um übliche Betonkiessande mit nur geringen kalkhaltigen Anteilen handelt - kaum einen Einfluß auf das Erwärmungsverhalten von Betonbauteilen hat, wurden die Zuschlagstoffe den Beständen des Instituts entnommen. Aufgrund von Siebanalysen zur Feststellung des Über- und Unterkornes in den einzelnen Fraktionen wurden die Zuschlagstoffmengen so gewählt, daß die Kornzusammensetzung etwa der Sieblinie B<sub>15</sub> entsprach. Das Mischungsverhältnis Zement : Wasser : Zuschlag (feucht) betrug 1 : 0,7 : 6,7 nach Gewichtsteilen. Entsprechend der Eigenfeuchte der Zuschlagstoffe ergab sich hieraus ein W/Z-Wert zwischen 0,71 und 0,73, im Mittel von 0,72 bei Ausbreitmaßen zwischen 39 und 41 cm. Der Luftporengehalt des Frischbetons wurde zu 2,6 bis 3,1 % bestimmt.

Für die Herstellung des Betons wurde Zement PZ 275 aus dem Werk "Alemannia" der Norddeutschen Portland-Zementfabrik AG. verwendet. Der Zementgehalt je m<sup>3</sup> eingebauten Betons betrug 295 kg.

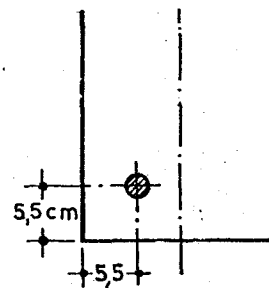
Die zum Zeitpunkt der Versuche durchgeführten Festigkeitsprüfungen ergaben im Mittel Würfeldruckfestigkeiten von 330 kp/cm<sup>2</sup> bei Rohdichten von 2200 bis 2290 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3 Spannglieder und Auspreßmörtel

Die Spannglieder wurden einheitlich mit einer auf ihre Achsen bezogenen unteren Betondeckung von 5,5 cm eingebaut. Bei den in Tafel 3 aufgeführten Prüfkörpern lagen sie im Meßquerschnitt I in der Prüfkörpermitte und im Meßquerschnitt II außermittig in 5,5 cm Entfernung vom seitlichen Rand. In den scheibenartigen Versuchskörpern (Tafel 2) wurden beide Hüllrohre in der Prüfkörpermitte angeordnet, das Hüllrohr im Meßquerschnitt II jedoch 25 cm =  $d/2$  vom unteren Rand entfernt.



Meßquerschnitt I



Meßquerschnitt II

Um für die Auswertung der Versuchsergebnisse gesicherte Anhaltspunkte über die Lage der Spannstähle in den Hüllrohren zu haben, wurden auf die Stähle Abstandshalter aufgeschweißt, so daß eine konzentrische Lage gewährleistet war. Zur Kontrolle wurden die Spannglieder nach den Brandversuchen vorsichtig ausgebaut und die Anordnung der Stähle überprüft (Bild 1 und 2).

Die Hüllrohre bestanden aus 0,2 bis 0,3 mm dickem, gewelltem Blech mit "Wellenhöhen" von 2,5 mm. Bei den 45 mm weiten Hüllrohren (entsprechend dem Verfahren BBRV) waren die Wellen senkrecht zur Achse angeordnet, bei den 32 mm und 37 mm weiten Rohren (entsprechend dem Verfahren D. u. W.) verliefen sie schraubenförmig. Weiterhin waren letztere so weit überfalzt, daß beim Betoniervorgang kein Zementleim in die Rohre eindringen konnte. Die 45 mm weiten Hüllrohre waren zusätzlich punktwise verlötet. In beiden Fällen wurde hierdurch jedoch kein wasser- bzw. gasdichter Abschluß der Hüllrohre erreicht, was in der Praxis auch nicht erforderlich ist.

Die Spannglieder wurden 2 Monate vor Beginn der Brandversuche ausgepreßt, wobei dem Auspreßmörtel (Mischungsverhältnis 50 kg Zement PZ 375 : 25 kg Wasser) 0,5 kg Tricosal (1 % des Zementgewichts) zur Plastifizierung beigegeben wurde.

### 3.4 Temperaturmeßstellen in den Versuchskörpern

Zur Fixierung der Thermoelemente aus Eisen-Konstantan (Drahtdurchmesser 0,5 mm) in den Versuchskörpern dienten besondere Halterungen in Form von Leitern mit "Holmen" aus Asbestzement und "Sprossen" aus 3 mm dickem Gewindestahl, an die die Thermoelemente mit dünnen Drähten angebunden wurden. Diese Anordnung gewährleistet nach [1] eine genaue Lage der Meßpunkte und kann darüber hinaus infolge der guten Temperaturleiteigenschaften der Gewindestangen örtliche Störungen im Betongefüge durch Lunker, große Zuschläge u. dergl. weitgehend wieder ausgleichen. Die genaue Lage der Meßstellen geht aus Anlage 3a bis 14d hervor.

Ergänzend ist hierzu noch zu bemerken, daß die mit arabischen Ziffern bezeichneten Meßstellen außerhalb der Hüllrohre angeordnet waren und die vom Hüllrohr aus gesehene, jeweils erste Meßstelle am Außendurchmesser des Rohres auf einem "Wellenberg" befestigt war. Weiterhin wurden in jedem Meßquerschnitt auch innerhalb der Hüllrohre an den Spannstählen Thermoelemente befestigt, so daß bei der Auswertung der Meßergebnisse auch Aufschlüsse über die Temperaturverteilung innerhalb der Stahlquerschnitte gewonnen wurden (Anlage 2).

## 4. Versuchsaufbau und -durchführung

### 4.1 Brandraum

Für die Versuche stand eine 1,5 m hohe Brandkammer mit den lichten Abmessungen 4,0 m x 10,0 m zur Verfügung, die so unterteilt wurde, daß ein Brandraum mit den Abmessungen 2,4 m x 4,0 m entstand (Anlage 1). Über den Brandraum wurden die 2,3 m langen Versuchskörper an Stahlträgern aufgehängt, daß ihr Abstand von der Unterkante der Brennerachse 0,75 m betrug. Die noch verbleibende Fläche über dem Brandraum wurde mit YTONG-Dachplatten abgedeckt, so daß die Platten nur 2 bis 3 cm auf den Prüfkörpern auflagen und eine Beobachtung der Prüfkörperoberseiten möglich war.

#### 4.2 Beheizung

Die Beheizung erfolgte durch 4 Hochdruck-Ölbrenner, die sich paarweise an den Stirnseiten des Brandraumes gegenüberlagen und deren Flammenachsen in Längsrichtung der Prüfkörper verliefen. Die Rauchgase wurden durch eine Austrittsöffnung im Brandraumboden abgesaugt. Als Brennstoff wurde Heizöl EL nach DIN 51 603 verwendet. Die Steigerung der Brandraumtemperaturen erfolgte nach der Einheitstemperaturkurve DIN 4102 Blatt 2, Ausgabe 1965, Abschnitt 5.2.4.

Zu Beginn der Versuche betrugen die Flammenlängen rd. 80 cm bis 100 cm. Von der 10. Versuchsminute an - oberhalb des steilen Temperaturanstiegs der Einheitstemperaturkurve - konnte dann die Flammenlänge auf rd. 30 cm bis 50 cm gedrosselt und über den weiteren Versuchszeitraum praktisch konstant gehalten werden, da sich die Temperaturen im Brandraum selbständig den einer logarithmischen Funktion folgenden Brandraumtemperaturen nach DIN 4102 anpaßten.

#### 4.3 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung im Brandraum erfolgte über Thermoelemente aus NiCr-Ni nach DIN 43 732, die nach DIN 4102, 10 cm seitlich und 10 cm unterhalb sowie auf halber Höhe zu beiden Seiten der Prüfkörper im Bereich jedes Meßquerschnittes angeordnet waren. Die Meßergebnisse wurden mit Hilfe von selbstdruckenden Kompensographen registriert. Entsprechend den Meßergebnissen wurden die Brenner gesteuert.

Die in den Prüfkörpern mit Thermoelementen aus Fe-Konst. gemessenen Temperaturen wurden ebenfalls mit Kompensographen registriert. Sie sind in der Anlage 3a bis 14d als Temperatur-Zeit-Diagramme wiedergegeben.

#### 4.4 Beurteilung der Versuchsbedingungen

Ein wesentlicher Mangel des Brandversuchswesens liegt im Fehlen einer genauen Definition der für das Bauteil maßgebenden Randbedingungen bei der Beflammung. Es ist bekannt, daß die Ergebnisse von Brandversuchen daher nur begrenzt reproduzierbar sind. Eine vollständige Reproduzierbarkeit ist auch dann nicht gegeben, wenn Versuche an der gleichen Versuchsanlage durchgeführt werden. Als Ursache dafür ist im wesentlichen der unterschiedliche Wärmeübergang

zwischen Brandraum und Bauteil [2] anzusehen. In der vorliegenden Versuchsreihe wurde versucht, für alle Probekörper möglichst einheitliche Randbedingungen zu verwirklichen.

Wie stark die Temperaturfelder im Bauteil durch eine Änderung der Randbedingungen beeinflusst werden können, wird aus den Diagrammen 12a bis d und 13a bis d ersichtlich. Infolge einer Veränderung der Abzugsverhältnisse des Brandraums, die durch Arbeiten an der benachbarten Brandkammer verursacht worden war, trat zwischen der 60. und 80. Versuchsminute ein starker Abfall in den Brandraumtemperaturen auf. Dieser Temperaturabfall wird von den oberflächennahen Thermoelementen in den Probekörpern sofort angezeigt. Man erkennt daraus, daß bei Brandversuchen schon geringfügige Veränderungen der thermischen Verhältnisse im Brandraum erheblichen Einfluß auf den Versuchsablauf haben können.

Wie schwierig es ist, bei Brandversuchen überhaupt eine gewisse Reproduzierbarkeit zu erreichen, läßt sich daraus ersehen, wenn man die Temperaturen der Meßstellen 4 bzw. 5 in den Plattenquerschnitten (Anlage: 3a bis c und 3d bis g) untereinander vergleicht. Es geht daraus hervor, daß sich selbst dann noch Schwankungen in den Randbedingungen bemerkbar machen, wenn in demselben Prüfkörper an gleichartigen, zur Brandkammer symmetrischen Meßpunkten Temperaturmessungen vorgenommen werden.

Bei der Auswertung von Brandversuchen kann daher nur eine kritische Sichtung aller beim Versuch aufgetretenen Erscheinungen zu allgemeingültigen Aussagen führen.

## 5. Versuchsergebnisse

### 5.1 Feuchtigkeitsgehalt der Versuchskörper

Zum Zeitpunkt der Versuche wurden aus den Feuchtigkeits-Probekörpern Proben aus verschiedenen Querschnittszonen gewonnen und in einem Trockenofen bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Auf das Trockengewicht bezogen, ergaben sich für die Querschnitte nach Tafel 1 und 3 Feuchtigkeitsgehalte in der Größenordnung von 3 bis 5 %, je nach der Querschnittstiefe, und in den äußeren Randbereichen solche von rd. 2 %. Für die



Scheiben (Tafel 2) wurden wegen ihrer geringen Breite im Kernbereich nur Feuchtigkeitsgehalte von 4 % ermittelt, die zu den Rändern wieder auf 2 % abfielen.

Der Auspreßmörtel in den Hüllrohren wies dagegen - unabhängig von Hüllrohr- und Querschnittsabmessungen des Probekörpers - Feuchtigkeitsgehalte in der Größenordnung von 14 bis 16 % auf. Entsprechende Werte wurden auch noch 1 1/2 Jahre nach Beendigung der Versuche an ausgelagerten Mörtelproben festgestellt. Dieser hohe Feuchtigkeitsgehalt hat erheblichen Einfluß auf die Erwärmung der Spannstähle bei Feuerangriff.

## 5.2 Allgemeine Beobachtungen während der Brandversuche

Unter Brandbeanspruchung zeigten alle Probekörper im allgemeinen die folgenden charakteristischen Phänomene:

In der ersten Versuchsphase ( $t < 15$  min) bildeten sich vor allem bei den balkenartigen Probekörpern an der nichtbeflammten Oberfläche in Abständen von 30 bis 50 cm senkrecht zur Längsachse verlaufende Querrisse, aus denen kurz nach ihrem Entstehen der Austritt von Wasser beobachtet werden konnte. Dieser Wasseraustritt war erheblich von den Probekörperabmessungen abhängig und dauerte bei den Profilen 28/56 und den Deckenplatten bis zur 90. Versuchsminute. Daneben wurden in fast allen Fällen auch an den beflamten Oberflächen in den ersten 30 bis 40 Versuchsminuten Wasseraustritte beobachtet, die sprudelnd oder fontäneartig in den Brandraum austraten.

Weiterhin konnte bei allen Prüfkörpern eine Verkrümmung der Balkenachsen bzw. der Deckenplatten zum Brandraum hin festgestellt werden. Diese ist durch die unterschiedliche thermische Ausdehnung der Querschnittsfasern bedingt.

## 5.3 Erwärmungsverhalten der Prüfkörper

### 5.3.1 Auswertung der Meßergebnisse

Der größte Teil der Meßergebnisse ist in Form von Temperatur-Zeit-Diagrammen wiedergegeben (Anlage 3a bis 14d). Diese Darstellungsart gestattet eine genaue Auswertung bezüglich kritischer Temperaturen an charakteristischen Punkten der Prüfkörper. In der vorliegenden Untersuchung interessieren insbesondere

die Temperaturen in der Umgebung der Spannstähle, sowie die Spannstahltemperaturen selbst. Neben den Temperatur-Zeit-Diagrammen sind für eine Auswertung auch Temperatur-Weg-Diagramme gut geeignet (Anlage 15a bis f). Für bestimmte Zeiten sind darauf die Temperaturen im Meßquerschnitt in Abhängigkeit von der Querschnittstiefe dargestellt. Es sind die Temperaturen in Prüfkörpern mit und ohne Bewehrung angegeben, so daß der Einfluß von Spanngliedern auf das Temperaturfeld deutlich wird.

Ausgehend von den Temperatur-Zeit-Diagrammen werden zunächst die Erwärmungsvorgänge diskutiert, wobei die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Spannverfahren deutlich werden.

### 5.3.2 Erwärmungsverhalten der Platten

Aufgrund der nur einseitigen Beflammung zeigen die plattenförmigen Probekörper die größte Feuerwiderstandsdauer. (Unter Feuerwiderstandsdauer soll in folgendem der Zeitpunkt verstanden werden, bei dem die mittlere Spannstahltemperatur  $450^{\circ}\text{C}$  beträgt. Nach [3] liegt dieser Wert im Bereich der für vergütete Spannstähle maßgebenden kritischen Stahltemperaturen.) Dabei sind die Konstruktionen mit kleinen Spannstahlquerschnitten, was bei konstantem Hüllrohrdurchmesser einem höheren Mörtelgehalt entspricht, denjenigen mit großen Spannstahlquerschnitten geringfügig überlegen. Wie schon in [1] festgestellt, zeigen die oberflächennahen Thermoelemente im Beton keinen Haltepunkt bei  $100^{\circ}\text{C}$  (infolge der Wasserverdampfung) an. Erst bei den weiter im Querschnitt liegenden Meßpunkten tritt ein ausgeprägter Haltepunkt auf. Im allgemeinen lagen die Meßpunkte mit Haltepunkt mehr als 7 cm unter der Betonoberfläche, d. h. sie lagen noch tiefer als die Spannstahlachsen. Die Wasserverdampfung begann daher zwischen der 25. und 35. Versuchsminute, wobei für Probekörper mit kleinen Hüllrohren in der Bewehrung die untere Grenze maßgebend ist. Die Haltezeit betrug durchschnittlich 50 bis 70 Minuten. An den Spannstählen selbst zeigte sich im allgemeinen kein Haltepunkt, obwohl der Auspreßmörtel einen sehr hohen Feuchtigkeitsgehalt besaß. Allerdings trat zur Zeit der Verdampfung eine erhebliche Verringerung der Aufheizgeschwindigkeit an den Spannstählen auf, was zur Vergrößerung der Feuerwiderstandsdauer beitrug.

Da der Feuchtigkeitstransport in Betonkörpern bei Feuerangriff bis heute noch nicht geklärt ist, lassen sich die dabei auftretenden Erscheinungen nur teilweise erklären. Die Unstetigkeiten der Meßpunkte 2, 3, 4 und 5 auf den Diagrammen 3a, b und f sind möglicherweise auf plötzliche Feuchtigkeitsumlagerungen zurückzuführen, so daß an bestimmten Punkten im Beton eine Verringerung der Aufheizgeschwindigkeit eintritt. In 5.3.4 wird auf diese Erscheinung noch näher eingegangen.

Die Unstetigkeiten der Meßpunkte 7 und 8 auf dem Diagramm 3d sind dagegen leicht zu erklären. Hierbei handelt es sich lediglich um Kontaktfehler der Thermoelemente, die nach Überprüfung der Anschlüsse beseitigt werden konnten.

### 5.3.3 Erwärmungsverhalten der Scheiben

Die scheibenartigen Betonprobekörper nach Tafel 2 verhalten sich im Feuer wesentlich ungünstiger als die Platten (Anlage 4a bis 5c). Der Einfluß der dreiseitigen Beflammung macht sich stark bemerkbar. Bereits zwischen der 18. und 25. Versuchsminute treten Haltepunkte auf. Aufgrund der geringen Querschnittsbreite und der dreiseitigen Beflammung sind die Haltezeiten nur kurz; sie liegen bei ungefähr 10 mm. Entsprechend hoch sind die Temperaturen an der Bewehrung. Nach 75 min beträgt die mittlere Spannstahltemperatur bereits 450 °C (Anlage 4a und b). Bei gleichem Spannstahlquerschnitt aber verringertem Hüllrohrdurchmesser wird diese Temperatur bereits nach 60 min erreicht (Anlage 5a und b), d. h. durch Verminderung des Gehaltes an Auspreßmörtel im Hüllrohr (um rd. 50 %) wurde die Feuerwiderstandsdauer um 15 min (20 %) herabgesetzt.

Eine nicht ganz leicht zu erklärende Erscheinung trat bei den Versuchen 4c und 5c auf. In beiden Fällen zeigten die Thermoelemente an den Spannstählen ausgeprägte Haltepunkte an. Bei allen anderen Versuchen wurde dieses nicht beobachtet. Nach 4c beträgt die Spannstahltemperatur am Haltepunkt 180 °C, dieses entspricht einem Dampfdruck von 12 at [4]. Die entsprechenden Werte des Versuches 5 c sind 125 °C und 2,5 at. Während eine Verdampfung bei 125 °C infolge der Porosität durchaus wahrscheinlich ist, liegt der Haltepunkt nach 4c etwas außerhalb des bei Brandversuchen an Betonkörpern fest-

gestellten Verdampfungsbereiches. Nach [5] ist eine Verdampfung in porösen Stoffen bei 180 °C durchaus möglich, man bedenke jedoch, daß der dem Dampfdruck von 12 at zugeordnete Porenradius bei  $8 \cdot 10^{-8}$  m liegt. Der Auspreßmörtel müßte also im Meßquerschnitt im wesentlichen Poren mit diesem Radius haben.

Es gibt mehrere Möglichkeiten den Haltepunkt der Spannstahltemperaturen nach 4c zu deuten. Beispielsweise ist es auch möglich, daß im Hüllrohr ein vollständig abgeschlossener Raum vorhanden war, aus dem das Wasser so lange nicht entweichen konnte, bis sich ein entsprechender Druck aufgebaut hatte. Doch ist auch diese Erklärung nicht ganz befriedigend. Aufgrund der niedrigen Spannstahltemperaturen gegen Ende des Versuches 4c (nach 120 min), die immer noch 40 bis 50 grd unter den niedrigsten Hüllrohrtemperaturen lagen, ist auch ein Meßfehler nicht ganz auszuschließen. Eine vollständige Erklärung des gegenüber den anderen Versuchen unterschiedlichen Erwärmungsverhaltens der Spannstähle nach 4c kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht gegeben werden.

#### 5.3.4 Erwärmungsverhalten der Balken

Die meisten Erwärmungsversuche wurden an Balken mit den Querschnittsabmessungen 20/40 durchgeführt (Anlage 6a bis 11d). Aus diesen Ergebnissen lassen sich daher die Vor- und Nachteile der verschiedenen Spannverfahren am besten ableiten. Bei den Balkenversuchen traten Haltepunkte zwischen der 22. bis 30. Versuchsminute auf, die Haltezeiten lagen zwischen 10 und 20 min. An den Spannstählen traten keine Haltepunkte auf; die Wasserverdampfung im Beton äußerte sich wie bei den Platten lediglich durch eine geringere Erwärmungsgeschwindigkeit im Stahl. Im allgemeinen zeigten nur die über den Hüllrohren liegenden Thermoelemente ausgeprägte Haltepunkte an, d. h. im Innern des Probekörpers trat an diesen Stellen durch die Beflamung eine gewisse Konzentration der Feuchtigkeit ein.

Bei Anordnung der Spannstähle in der Prüfkörpermitte (vergl. S. 8, Meßquerschnitt I) lagen die Zeiten bis zur Erreichung einer Stahltemperatur von 450 °C zwischen 110 und 130 min, wobei die großen Hüllrohrdurchmesser bei gleichen Spannstahlquerschnitten (gleichbedeutend einem höheren Mörtelgehalt) den kleinen Durchmessern überlegen waren (vgl. 8a und b mit 11a und b).

Etwas außerhalb des oben angegebenen Bereiches liegen die Meßergebnisse der Anlage 10a und b. Eine mittlere Spannstahltemperatur von  $450^{\circ}\text{C}$  wurde erst nach 140 min erreicht. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von anderen Balkenversuchen (insbesondere 10c, d und 11a bis d) läßt sich sagen, daß die gemessenen Spannstahltemperaturen nach 10a und b durchweg zu niedrig sind und sich mit den übrigen Versuchsergebnissen nicht vergleichen lassen.

Bei ausmittiger Anordnung der Spannstähle in den Balken (vgl. S. 8, Meßquerschnitt II) wurde die Stahltemperatur von  $450^{\circ}\text{C}$  bereits nach 85 bis 95 min erreicht, d. h. 25 bis 35 min früher als bei der symmetrischen Anordnung. Vergleicht man die Feuerwiderstandsdauer der scheibenartigen Probekörper (Anlage 4a, b, 5a und b) mit den Werten der entsprechenden balkenartigen Probekörper (8a bis d, 11a bis d), so erkennt man den Vorteil der "dickeren" Bauteile. Auch bei ausmittiger Anordnung der Spannstähle in den Balken ergibt sich (bei gleichen Überdeckungsmaßen) gegenüber den Scheiben bis zur Erreichung der Stahltemperatur von  $450^{\circ}\text{C}$  eine um 10 bis 20 min höhere Feuerwiderstandsdauer. Es zeigt sich hier sehr deutlich, daß schlanke Betonkonstruktionen bei Feuerangriff im allgemeinen unvorteilhaft sind.

Ein ebenfalls wichtiges Ergebnis läßt sich ableiten, wenn man die Versuche 6a bis d und 7a bis d miteinander vergleicht. Geht man davon aus, daß dabei die thermischen Randbedingungen gleich waren, so bestand der einzige Unterschied der Probekörper im unterschiedlichem Spannstahldurchmesser. Es zeigte sich, daß die Feuerwiderstandsdauer der Probekörper 6a bis d durchschnittlich 10 min. größer war als bei den Probekörpern 7a bis d. Bei gleichen Stahl- und Mörtelquerschnitten ist es demnach vorteilhafter, mehrere Spannstähle mit kleinen Durchmessern als einen Spannstahl mit einem großen Durchmesser zu verwenden.

Die Balken mit den Querschnittabmessungen 28/56 zeigten durchweg ein ähnliches Verhalten wie die Balken 20/40. Bei außermittiger Anordnung der Spannglieder wurden Feuerwiderstandsdauern von 100 bis 110 min erreicht (Anlage 12c, d, 13c, d, 14c und d). Diese Werte liegen zwischen den Werten der Platten und Balken 20/40, d. h. sie bestätigen die Feststellung, daß "dicke" Bauteile bei Feuerangriff vorteilhaft sind. Etwas außerhalb

der allgemeinen Tendenz liegen die Spannstahltemperaturen nach 12a, b, 13a, b, 14a und b. Die Meßergebnisse sind teilweise günstiger als bei den Platten; dieses ist theoretisch nicht begründet und durch Abweichungen in den thermischen Randbedingungen und Fehlern bei der Temperaturmessung zu erklären. Deshalb sind die Spannstahltemperaturen wahrscheinlich etwas zu niedrig ausgefallen.

Eine sehr bemerkenswerte Erscheinung, die in 4.3.2 schon erwähnt wurde, trat bei den Versuchen 12a, 13a und 14a auf. Von der 20. bis 30. Versuchsminute an, d. h. mit Beginn der Wasserverdampfung, traten an den 5 Meßstellen, die senkrecht unter dem Hüllrohr der Spannglieder lagen, markante Temperaturabfälle auf. Sie lassen sich nur schwer erklären. Das systematische Auftreten der Temperaturabfälle läßt allerdings darauf schließen, daß Meßfehler nicht die Ursache dieser Störungen waren. Vermutlich traten bei diesen Versuchen in der Umgebung der Hüllrohre vertikale Risse in den Meßquerschnitten auf, so daß plötzlich Wasser von den kälteren Betonzonen in die heißen Betonzonen gelangen konnte, wodurch ein lokal begrenzter Temperatursturz verursacht wurde.

In diesem Zusammenhang scheint die Feststellung wichtig, daß in keinem der durchgeführten Versuche Abplatzungen an den Probekörpern beobachtet wurden, obwohl der Auspreßmörtel einen sehr hohen Feuchtigkeitsgehalt hatte. Da in der vorliegenden Untersuchung aber nur das thermische Verhalten von mit nachträglichem Verbund vorgespannten Konstruktionen bestimmt werden sollte, hatte man auf die Vorspannung der Spannglieder verzichtet (vgl. Abschnitt 2). Die Versuche unterstützen daher die Vermutung, daß Abplatzungen immer nur dann auftreten, wenn an beflamten Bauteilen größere Feuchtigkeitsgehalte und größere Spannungen zusammen auftreten.

### 5.3.5 Einfluß der Spannglieder auf das Erwärmungsverhalten der Bauteile

Das Erwärmungsverhalten von mit nachträglichem Verbund vorgespannten Bauteilen wurde in den vorhergehenden Abschnitten behandelt. Dabei konnten die Einflüsse der Bauteilgeometrie, des Auspreßmörtels und der verschiedenen Spanverfahren auf die Feuerwiderstandsdauer ermittelt werden.

Wichtig ist nun noch die Frage, inwieweit Temperaturfelder in Bauteilen mit Spanngliedern mit den Temperaturfeldern in (gleichartigen) Bauteilen ohne Spannglieder übereinstimmen. Anhand der Temperatur-Weg-Diagramme (Anlage 15a bis f) läßt sich darauf eine Antwort geben. Bis zur 30. Versuchsminute stimmen danach die Temperaturen in den gestörten und ungestörten Betonquerschnitten weitgehend überein. Mit fortschreitender Versuchsdauer bleiben dann die Spannstahltemperaturen gegenüber den Temperaturen in den ungestörten Betonquerschnitten zurück, wobei die Temperaturdifferenzen in der Höhe des Überdeckungsmaßes (5,5 cm) nach 90 min bis zu 100 grd betrugen. Im weiteren Versuchsablauf scheinen diese aber wieder etwas abzunehmen, was aufgrund der Selbstbegradigungstendenz in Temperaturfeldern theoretisch durchaus begründet ist. Dieser allgemeine Einfluß der Spannglieder auf das Temperaturfeld geht besonders gut aus 15c, d, e und f hervor. Man sieht außerdem, daß auf der beflamten Seite zwischen dem Hüllrohr und den Spannstählen ein starker Temperaturgradient vorhanden ist, während in den Spannstählen selbst die Temperatur nur wenig abfällt. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von Beton und Stahl war dieses auch nicht anders zu erwarten.

Abweichungen von den bisher angesprochenen Meßergebnissen zeigen die Temperatur-Weg-Diagramme 15a und b. Das Diagramm 15a enthält die Ergebnisse von nur mit Mörtel ausgepreßten Hüllrohren in Platten. In dem Hüllrohr mit 32 mm Durchmesser liegen die Temperaturen durchweg höher als im ungestörten Betonquerschnitt. Dieses Verhalten zeichnet sich bereits nach 30 min ab. Daraus kann man schließen, daß bei diesem Versuch der Probekörper stärker beheizt wurde, d. h. die thermischen Randbedingungen sind mit denen der übrigen Versuche nicht zu vergleichen. Ähnlich liegen die Verhältnisse auf dem Diagramm 15b. Hier zeigt sich besonders stark die Tendenz der Selbstbegradigung, d. h. nach langen Versuchszeiten stellt sich in der gestörten Betonzone, im Rahmen der Meßgenauigkeit von 30 bis 40 grd, ungefähr das gleiche Temperaturniveau ein wie im ungestörten Beton.

## 6. Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis

Untersuchungen über das Erwärmungsverhalten von Betonbauteilen unter Brandbeanspruchung nach DIN 4102 sind für die Praxis vor allem dort interessant, wo entsprechend den statischen Erfordernissen geringere Querschnittsabmessungen gewählt werden könnten - die Berücksichtigung feuertechnischer Belange jedoch größere Betondeckungen erfordert. Größere Betondeckungen führen bei gleicher gewünschter Tragfähigkeit zu einer Vergrößerung des Spannstahlquerschnittes. Die hier untersuchten Spanngliedabmessungen liegen im Bereich der im normalen Hochbau verwendeten Konstruktionen. Bei noch größeren Vorspannkräften sind auch massivere Betonquerschnitte erforderlich, bei denen ohnehin größere Betondeckungen gewählt werden, was sich feuertechnisch nur günstig auswirken kann.

In den Untersuchungen nach [1] konnte das Erwärmungsverhalten von Stahlbetonbauteilen aufgrund einer Brandbeanspruchung nach DIN 4102 geklärt werden. Es wurde dabei festgestellt, daß die im Stahlbetonbau üblichen Bewehrungseinlagen im Temperaturfeld örtlich Störungen hervorrufen, diese bei der Bemessung von Bauteilen für den Brandfall aber berücksichtigt werden, wenn die für eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse erforderliche Betondeckung auf die Achse der Bewehrungsstäbe bezogen wird. In der vorliegenden Untersuchung sollte geklärt werden, ob ein entsprechendes Vorgehen auch bei mit nachträglichem Verbund vorgespannten Konstruktionen möglich ist.

Die in diesem Programm erzielten Ergebnisse deuten darauf hin, daß sich bei den mit nachträglichem Verbund vorgespannten Konstruktionen, bei denen die Spannstähle in mit reinem Zementmörtel ausgepreßten Hüllrohren vorliegen, gegenüber üblichen Stahlbeton- oder mit sofortigem Verbund vorgespannten Konstruktionen in den Spanngliedachsen gewisse Temperaturverzögerungen eintreten. Als Hauptursache ist hierfür der hohe Feuchtigkeitsgehalt des Auspreßmörtels anzusehen. Eine Anwendung der in dieser Untersuchung ermittelten positiven Ergebnisse, im Sinne einer Herabsetzung der erforderlichen Betondeckungen für mit nachträglichem Verbund vorgespannte Konstruktionen stehen aber zwei wichtige Gesichtspunkte entgegen:



1. Infolge der in 4.4 beschriebenen Zusammenhänge und durch meßtechnisch bedingte Fehler müssen gewisse Schwankungen der Meßergebnisse in Kauf genommen werden, so daß die Temperaturfelder in Bauteilen nur unter Berücksichtigung einer gewissen Fehlergrenze angegeben werden können. Es erscheint daher nicht sinnvoll, bei der Auslegung von Bauteilen nach feuertechnischen Gesichtspunkten bis an die äußerste Bemessungsgrenze heranzugehen.
2. In der Praxis wird die geprüfte Versuchsanordnung mit einer genauen konzentrischen Lage der Spannstähle im Hüllrohr wahrscheinlich nur selten erreicht. Es ist damit zu rechnen, daß sich die Spannglieder in ungünstigen Fällen zur Feuerseite verschieben. Gegenüber den gemessenen Werten sind dann aber erhebliche Temperaturerhöhungen an den Spannstählen zu erwarten, die sich örtlich von den in diesen Versuchen ermittelten Hüllrohrtemperaturen sicher nicht wesentlich unterscheiden werden. Von diesem Standpunkt aus gesehen müssen die Untersuchungsergebnisse mit einer gewissen Vorsicht beurteilt werden.

Da die Gebrauchsfähigkeit der Spannstähle im wesentlichen - je nach Stahlgüte und Ausnutzungsgrad - von ihrer absoluten Temperatur abhängt (die Erwärmungsgeschwindigkeit ist bekanntlich nur von untergeordneter Bedeutung), muß aus den vorher genannten Gründen auf eine Verringerung der erforderlichen Betondeckungen verzichtet werden. Auf mit nachträglichem Verbund vorgespannten Konstruktionen können aber die gleichen Richtlinien wie bei schlaff bewehrten oder mit sofortigem Verbund vorgespannten Bauteilen angewendet werden. Die Betondeckung ist entsprechend den Ergebnissen nach [1] auf die Achse der Spannglieder zu beziehen. Im allgemeinen wird man damit bei der Bemessung auf der sicheren Seite liegen.

## 7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Erwärmungsvorgänge an mit nachträglichem Verbund vorgespannten Bauteilen behandelt. Die Versuchsreihe umfaßte Platten, Scheiben und Balken. Es wurden mehrere Spannverfahren und unterschiedliche Querschnittsabmessungen der Spannglieder untersucht.

Die Ergebnisse sind in Form von Temperatur-Zeit-Diagrammen und Temperatur-Weg-Diagrammen dargestellt. Daraus geht die Beeinflussung der Temperaturfelder infolge der Spannglieder hervor. Es wurde festgestellt, daß die Geometrie des Bauteiles, der Feuchtigkeitsgehalt des Auspreßmörtels und die Querschnittsfläche der Spannstähle auf den Erwärmungsvorgang maßgeblichen Einfluß haben.

Teilweise positive Versuchsergebnisse lassen sich allerdings zur Zeit nicht auf die Praxis übertragen, weil beim Einbau der Spannstähle mit erheblichen Unsicherheiten zu rechnen ist. Eine Bemessung in Anlehnung an die für normale Bewehrungen gefundenen Lösungen erscheint daher zweckmäßig.

## 8. Literaturverzeichnis

- [1] H. Ehm u. R. v. Postel:  
Untersuchungen über Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Betonbauteilen unter Brandbeanspruchung.  
Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau,  
Prof. Dr.-Ing. Karl Kordina (1967)
- [2] H. Ehm:  
Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen.  
Dissertation T. U. Braunschweig (1966)
- [3] W. Jäniche u. H. Wascheidt:  
Warmkriechversuche an Spannstählen.  
Beitrag zur FIP-Tagung Braunschweig, Bauverlag G.m.b.H.,  
Wiesbaden (1965)
- [4] Hütte I a, 28. Auflage, W. Ernst u. Sohn, Berlin (1955)
- [5] N. V. Waubke:  
Transportphänomene in Betonporen.  
Dissertation T. U. Braunschweig (1966)

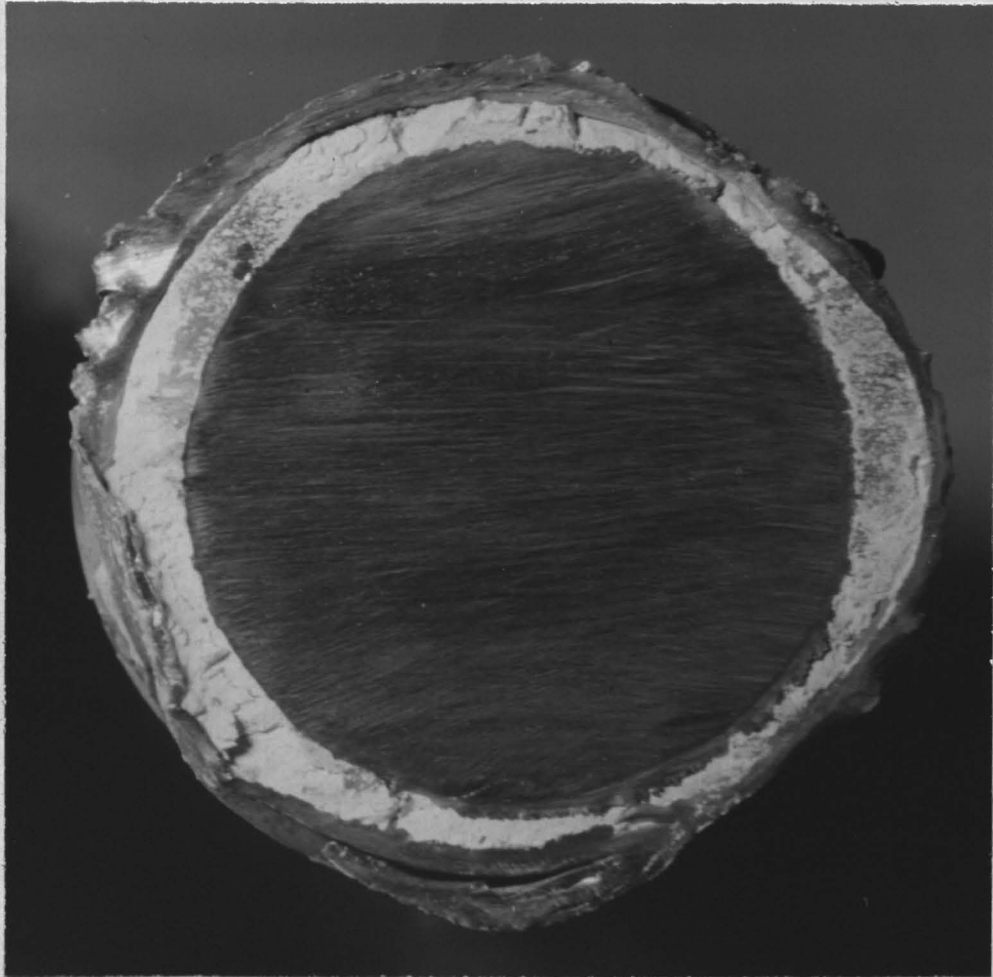


Bild 1: Spannstahl (32 mm Durchmesser) im ausgepreßten Hüllrohr  
(37 mm Durchmesser) nach dem Erwärmungsversuch

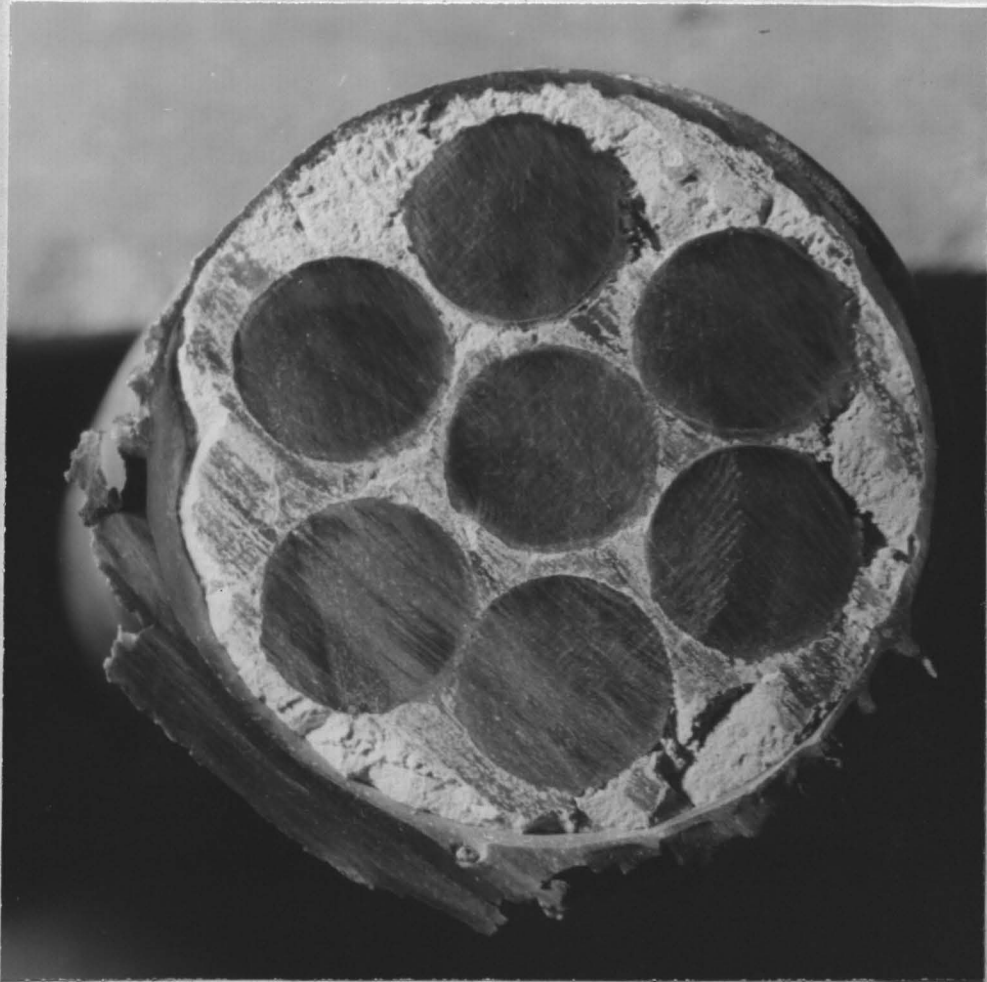
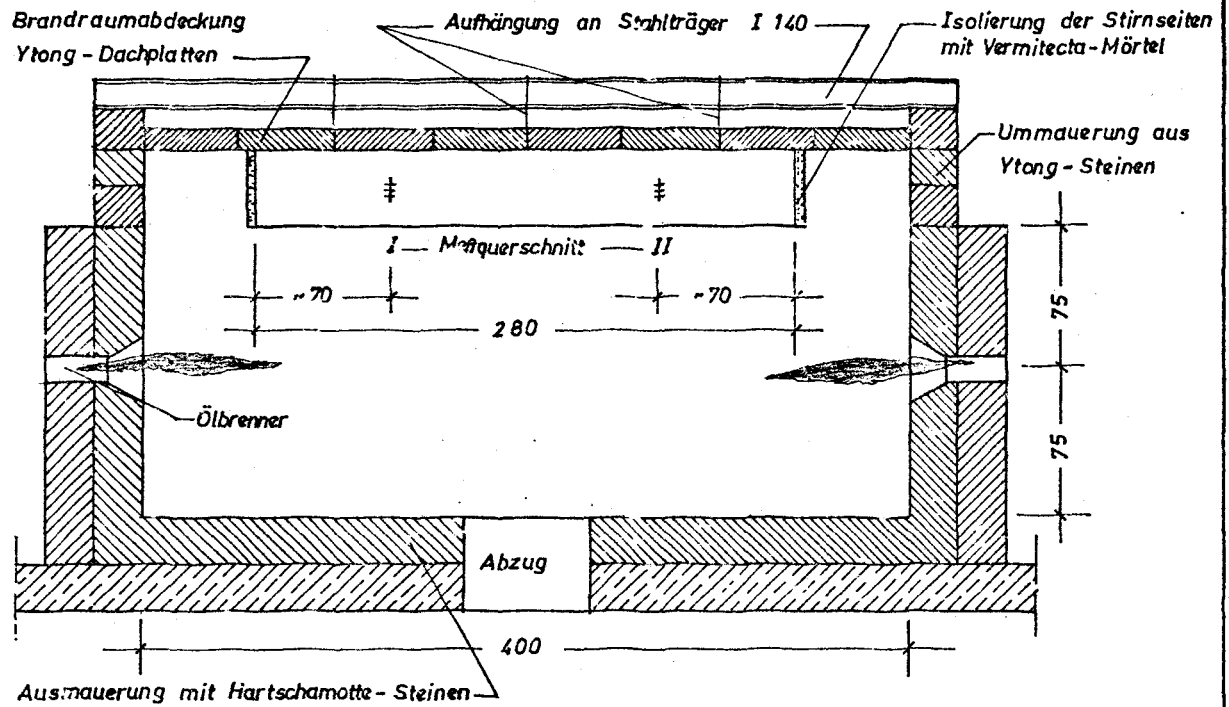
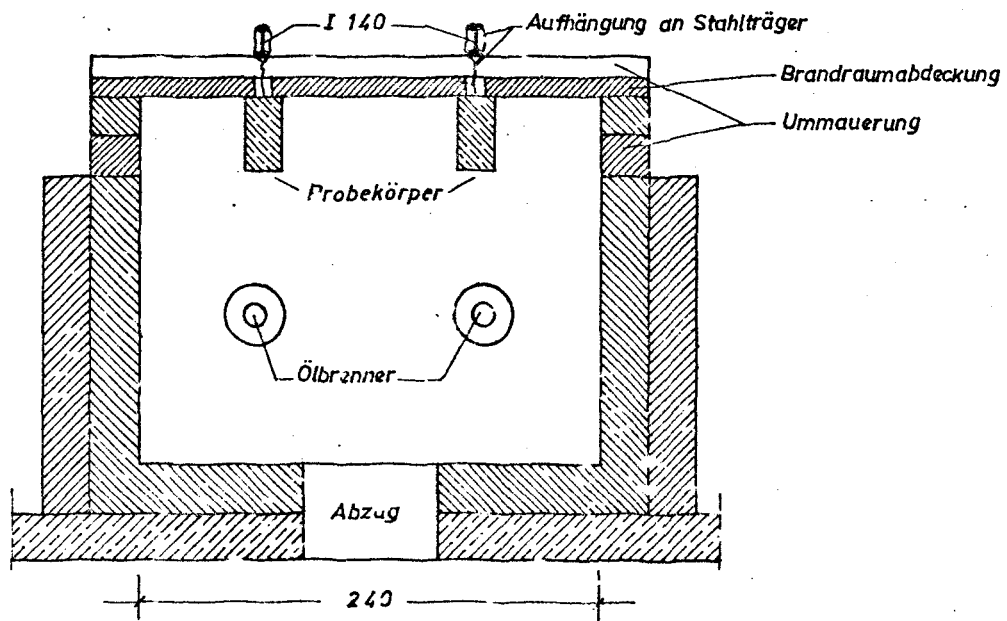


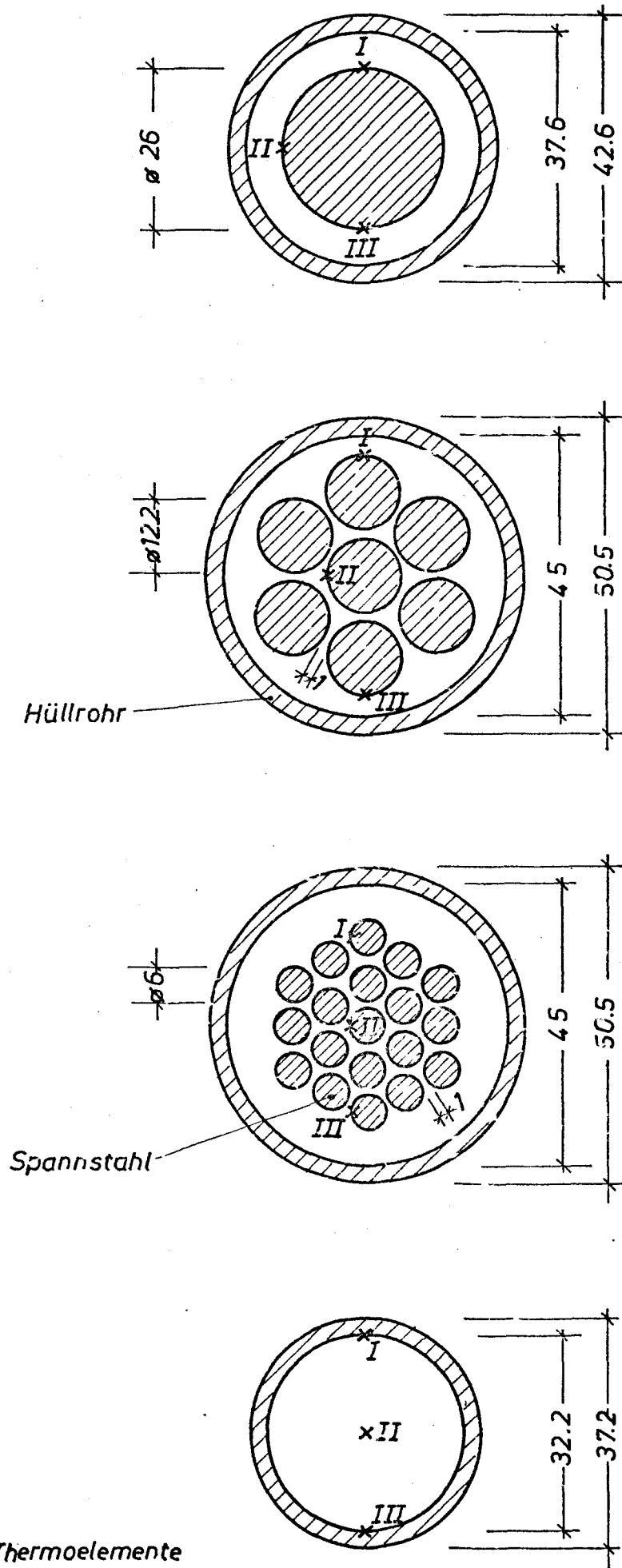
Bild 2: Spannstähle (12 mm Durchmesser) im ausgepreßten Hüllrohr  
(45 mm Durchmesser) nach dem Erwärmungsversuch

## Längsschnitt



## Querschnitt

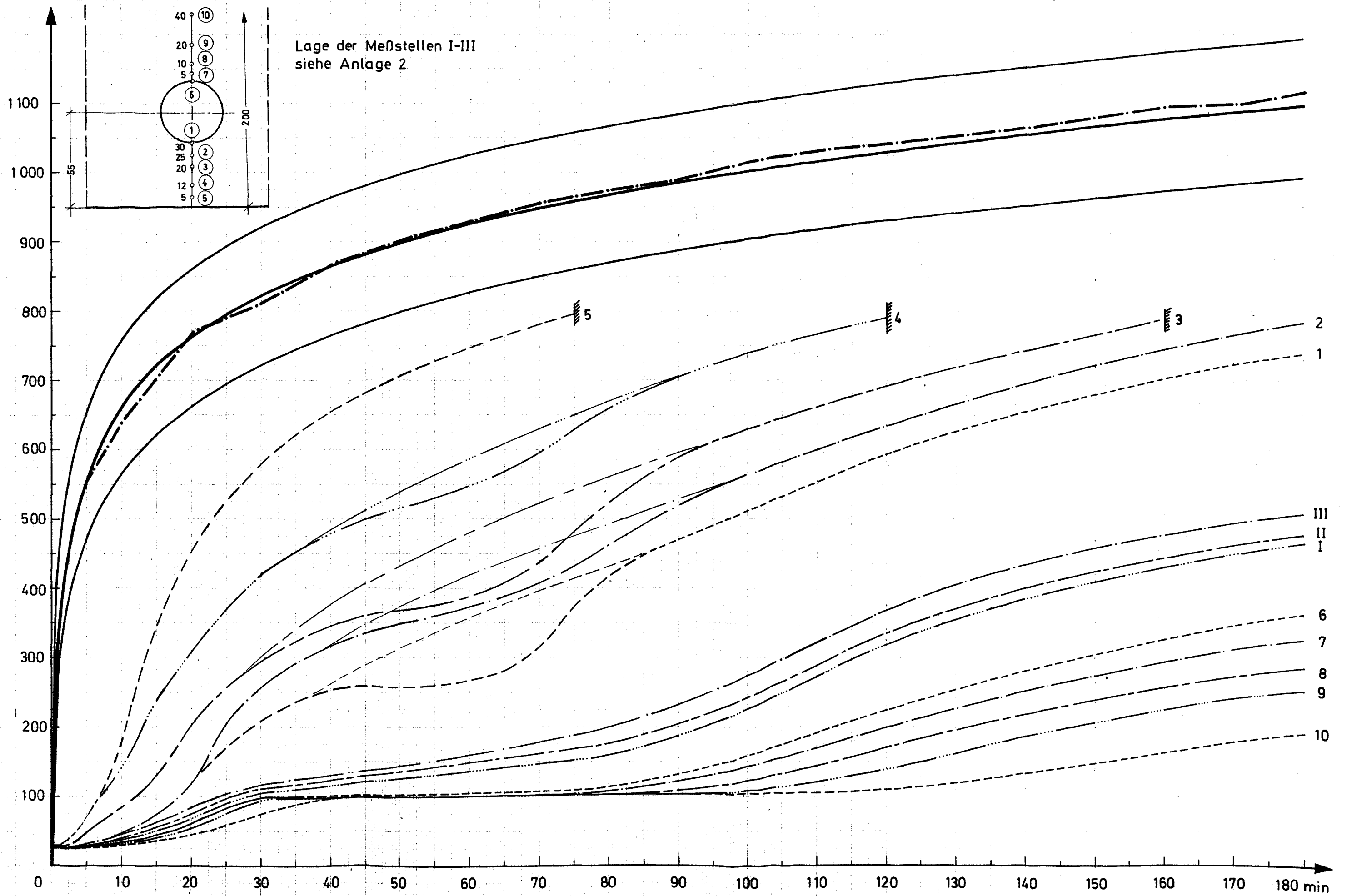




I, II, III Thermoelemente

Maße in mm

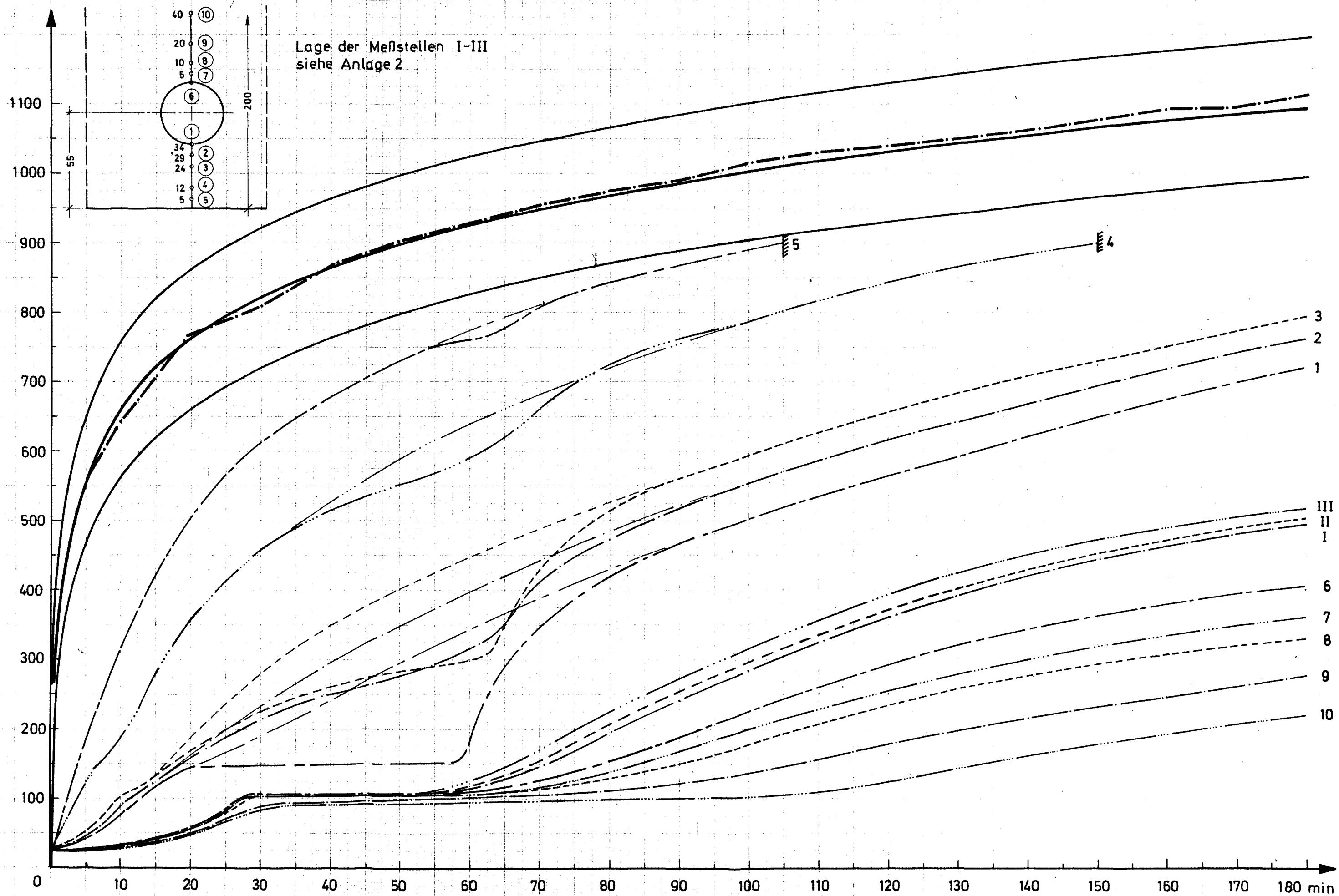




H.-Ø 45 mit 7 Spannstählen Ø 12  
Plattenquerschnitt

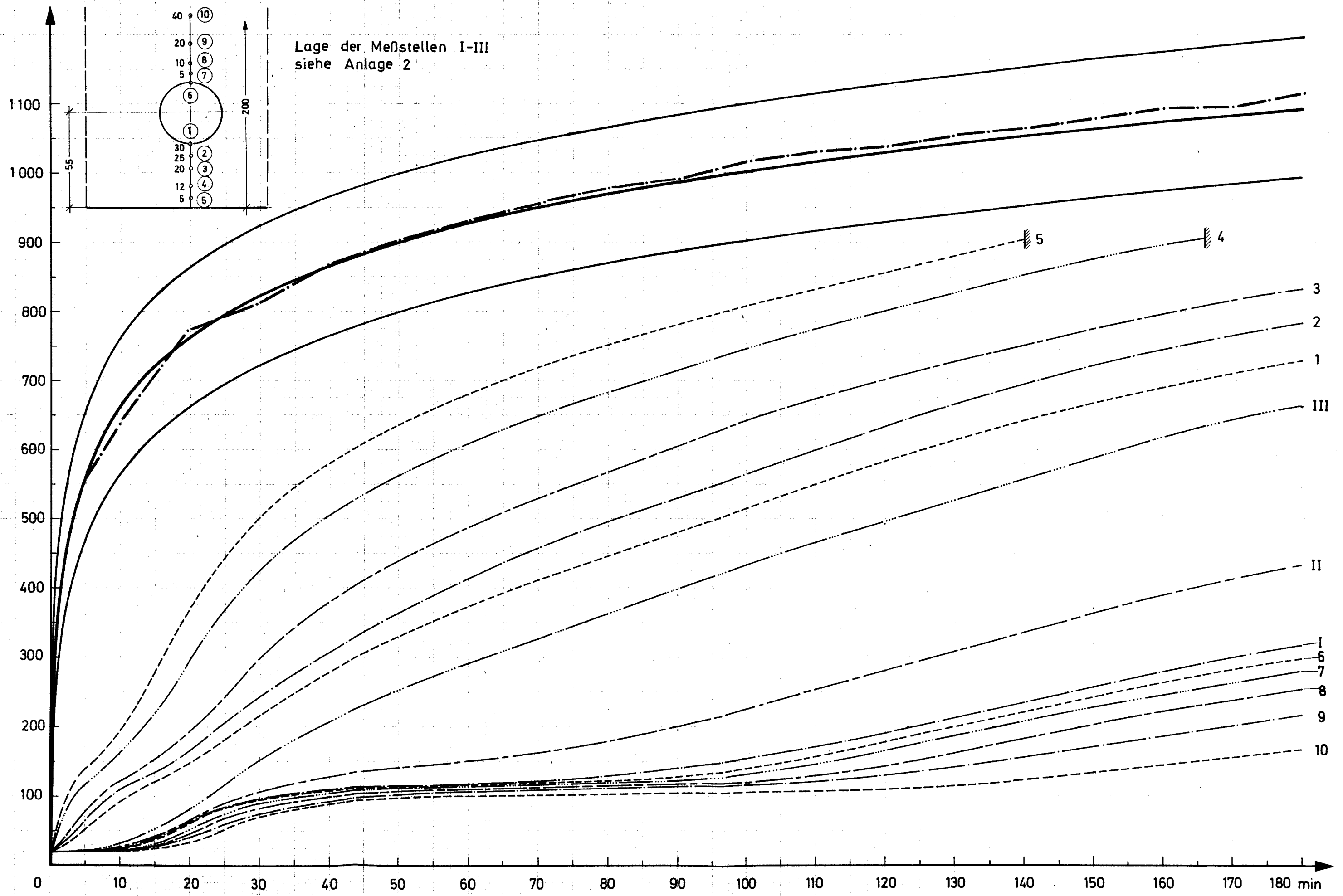
Anlage 3a





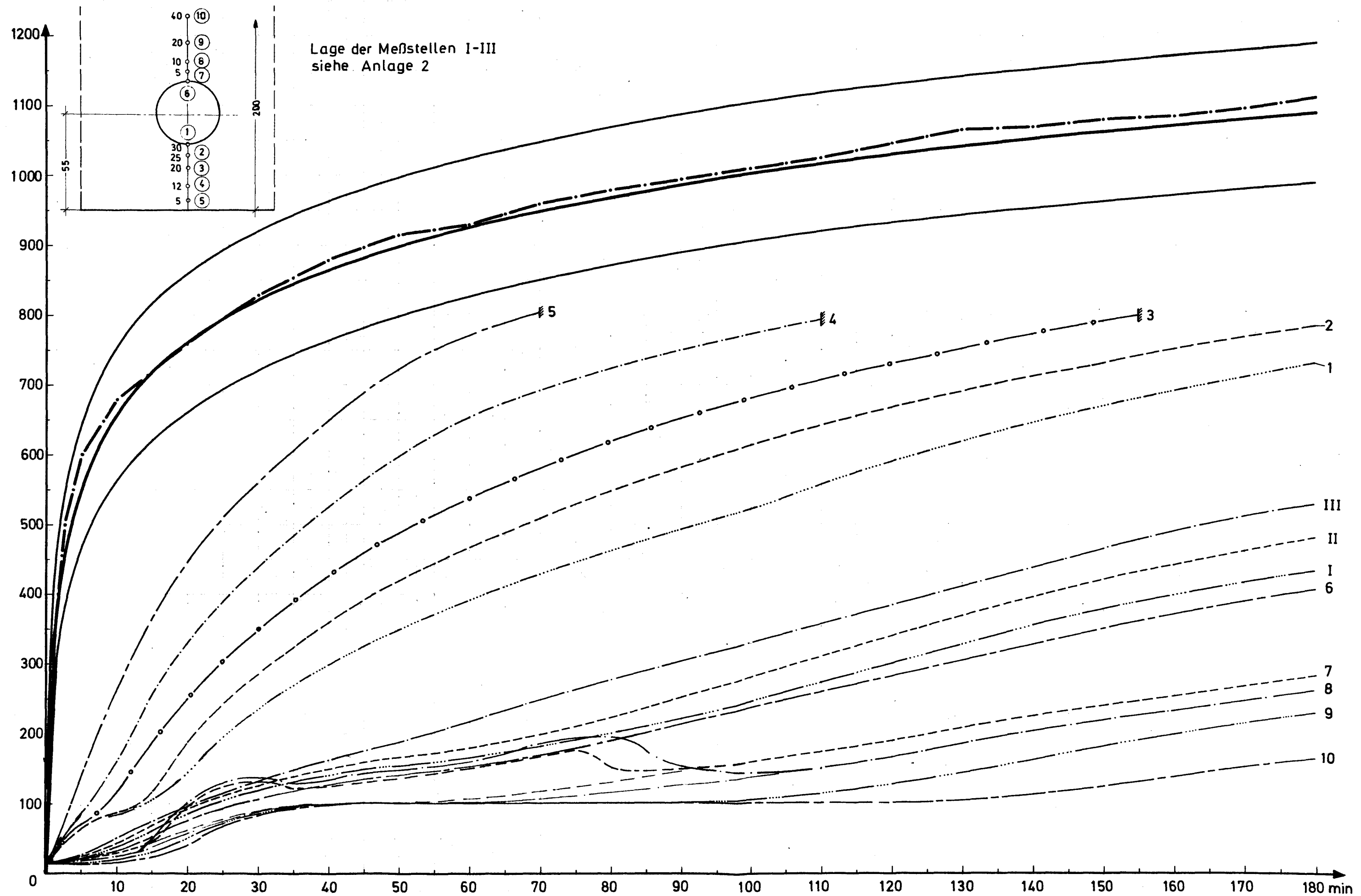
H.- Ø 37 mit Spannstahl Ø 32  
Plattenquerschnitt

Anlage 3b



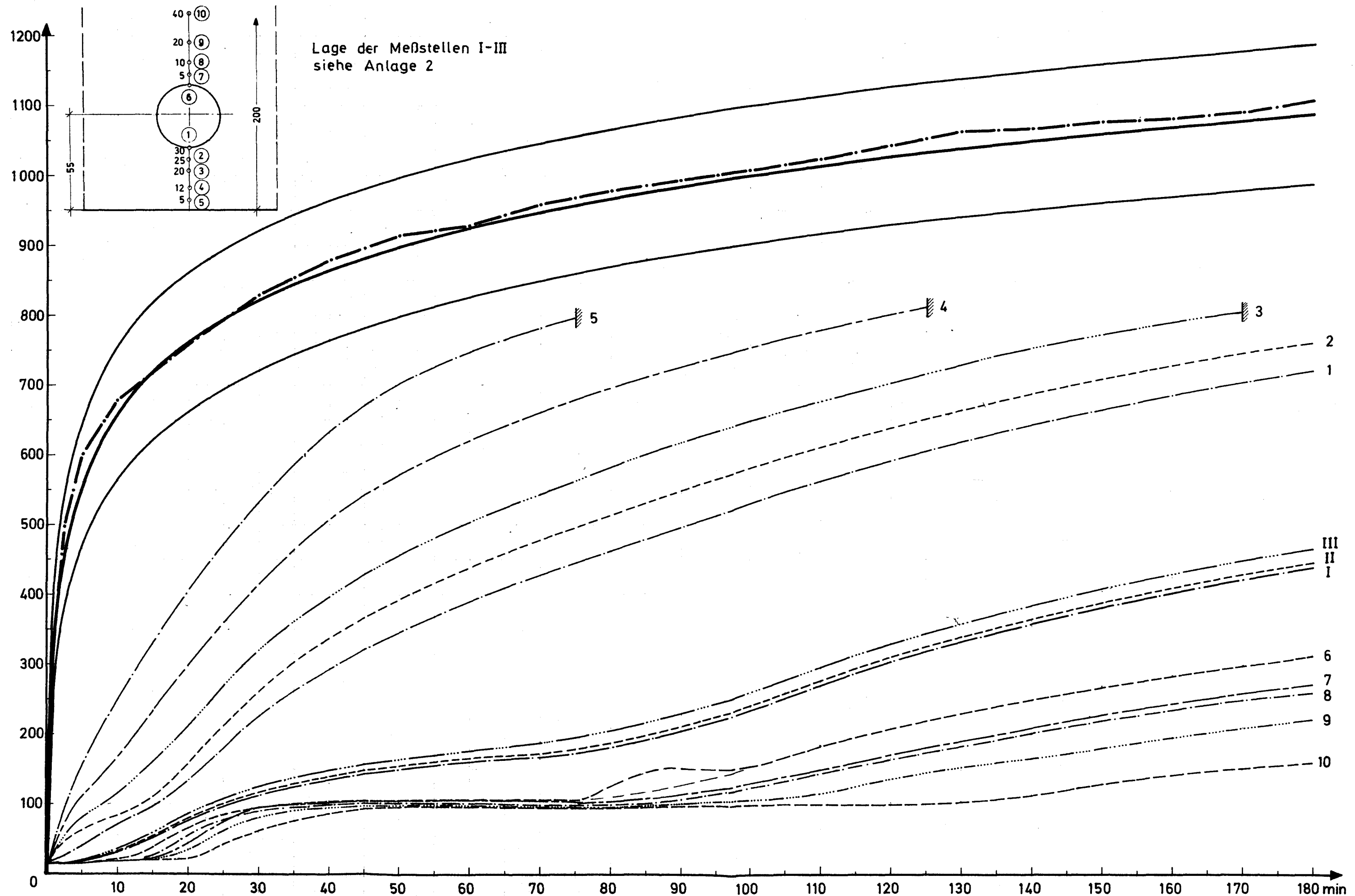
H.-Ø 45 nur ausgepreßt  
Plattenquerschnitt

Anlage 3c



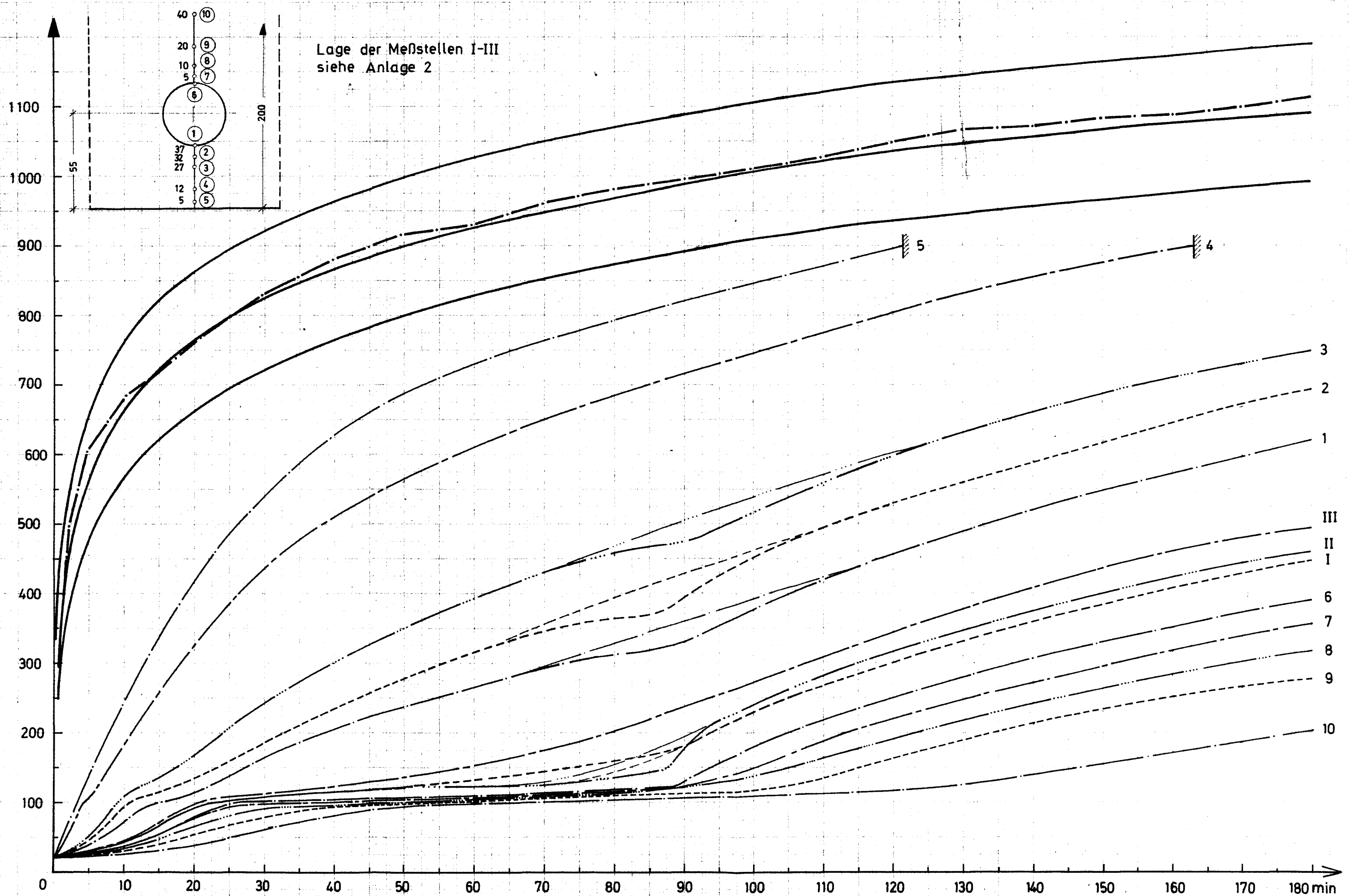
H. Ø 45 mit 19 Spannstählen Ø 6  
Plattenquerschnitt

Anlage 3d



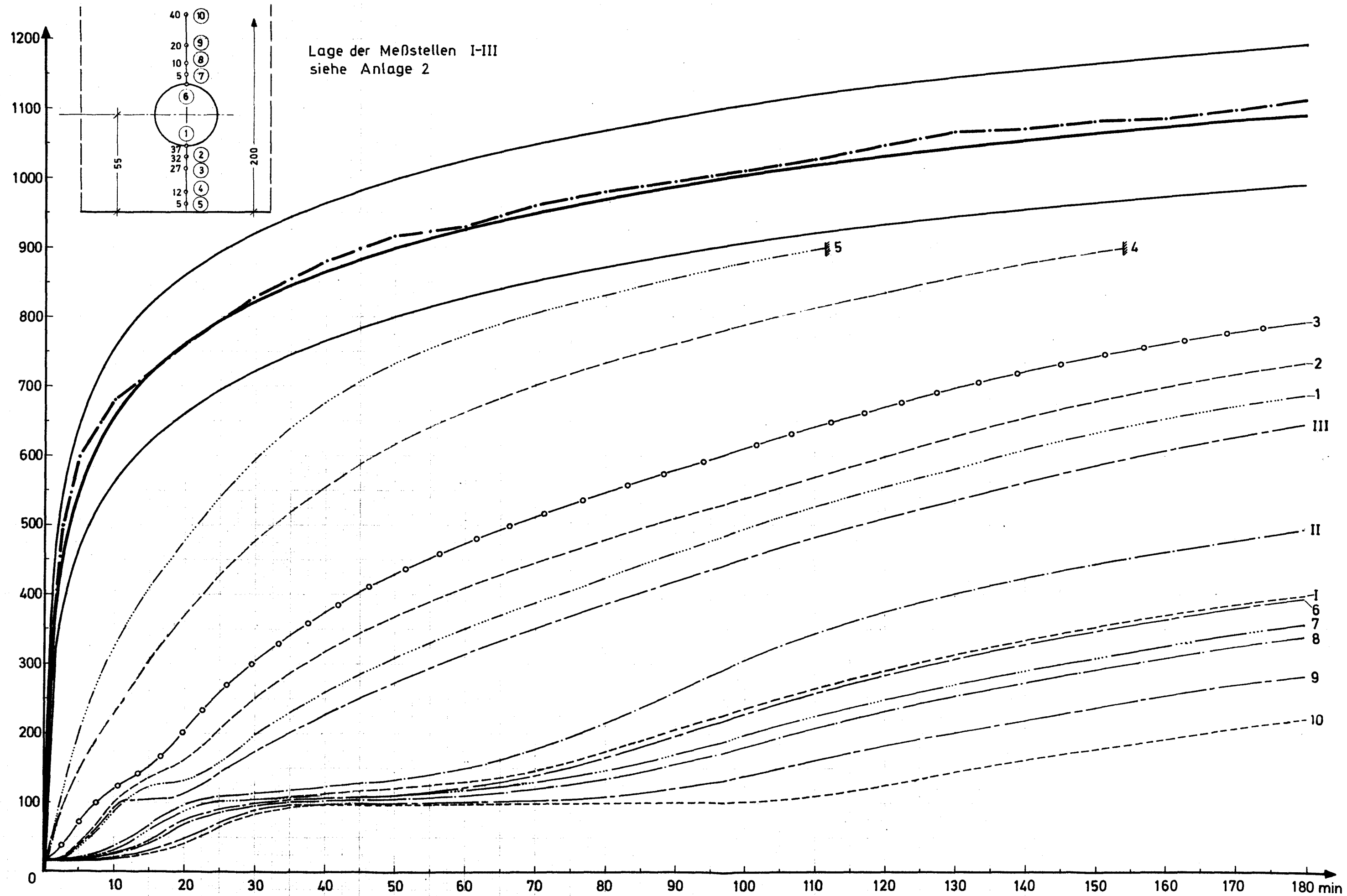
H.-Ø 45 mit Spannstahl Ø 26  
Plattenquerschnitt

Anlage 3e



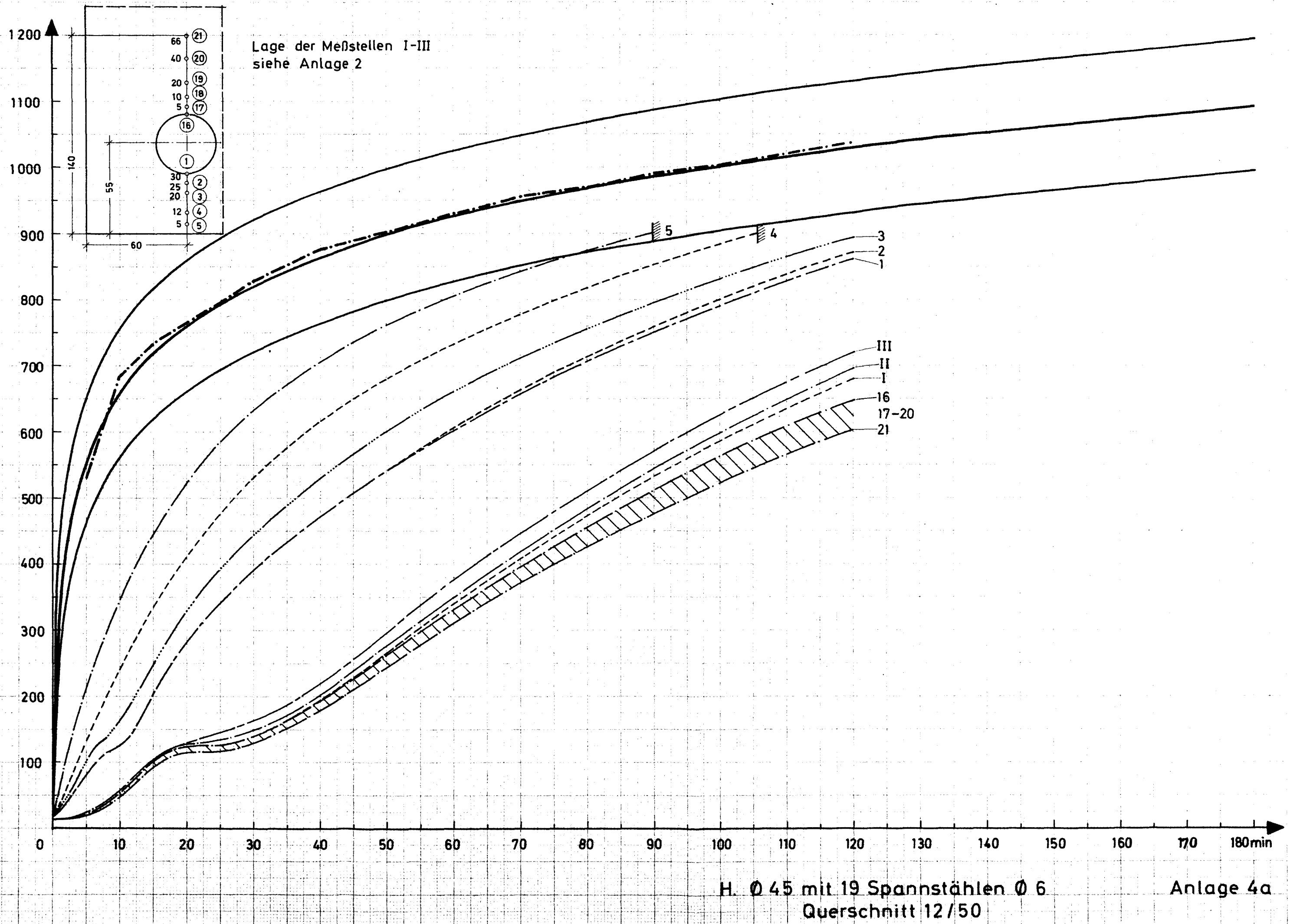
H.-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26  
Plattenquerschnitt

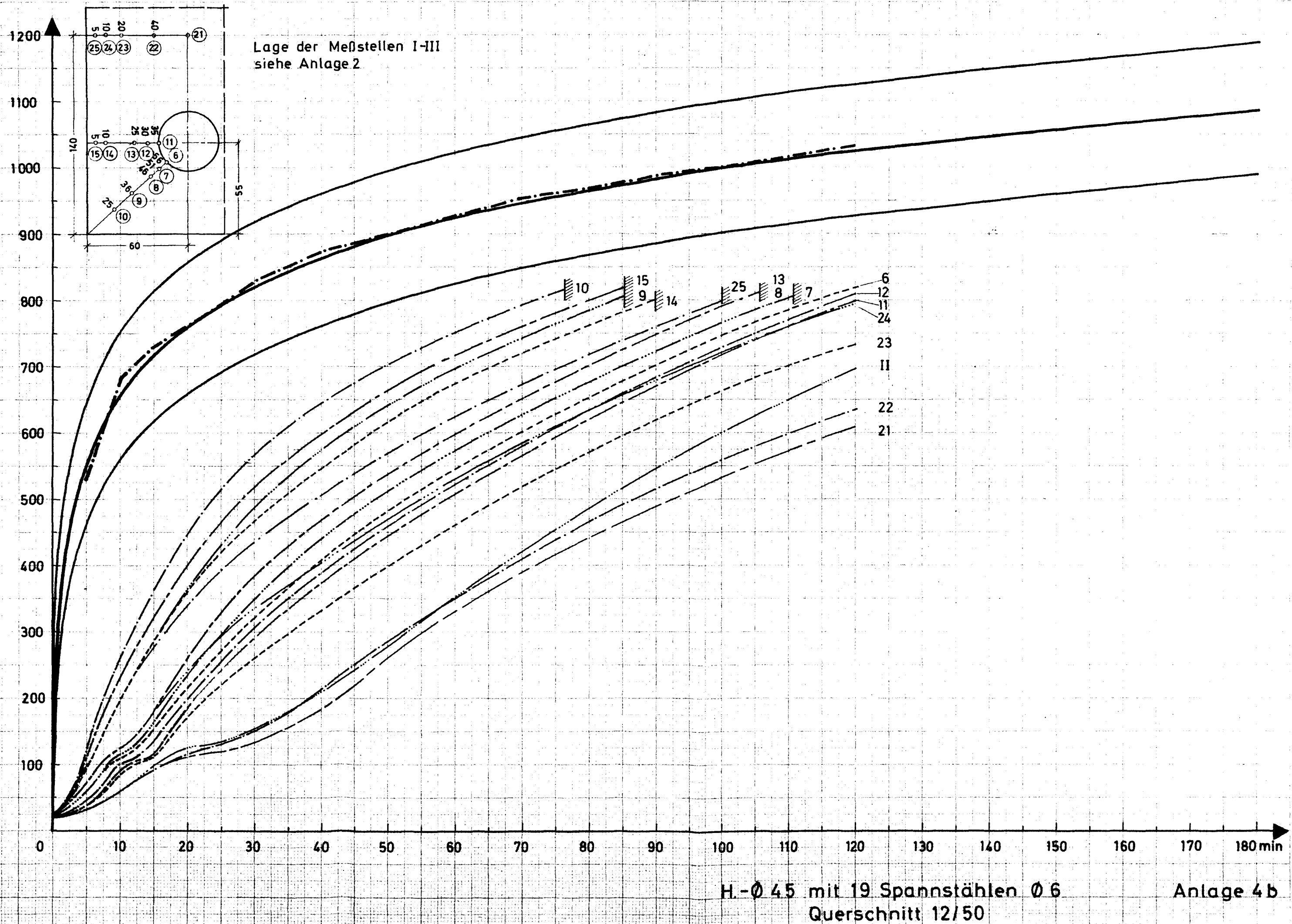
Anlage 3f



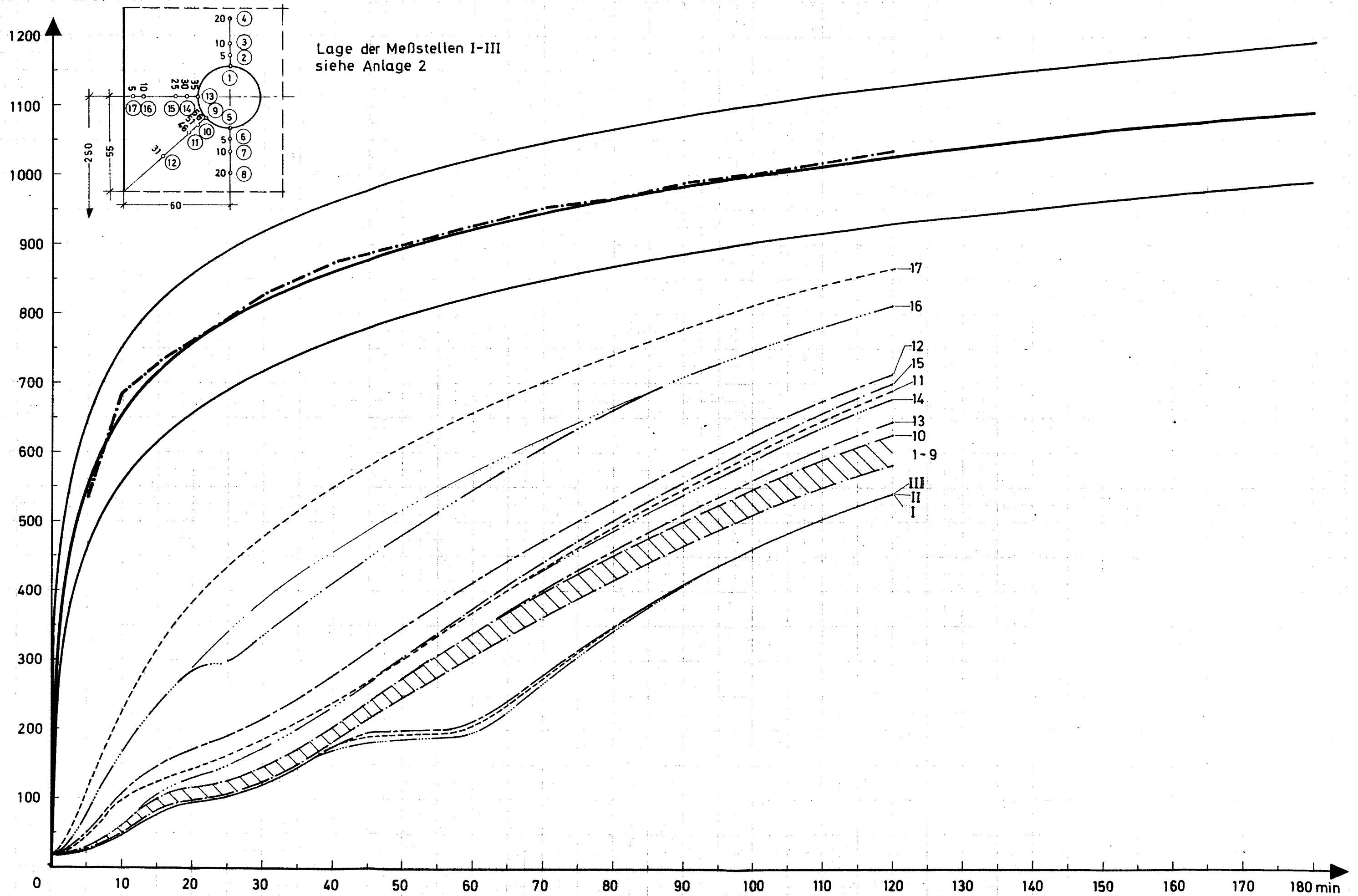
H.-Ø 32 nur ausgepreßt  
Plattenquerschnitt

Anlage 3g



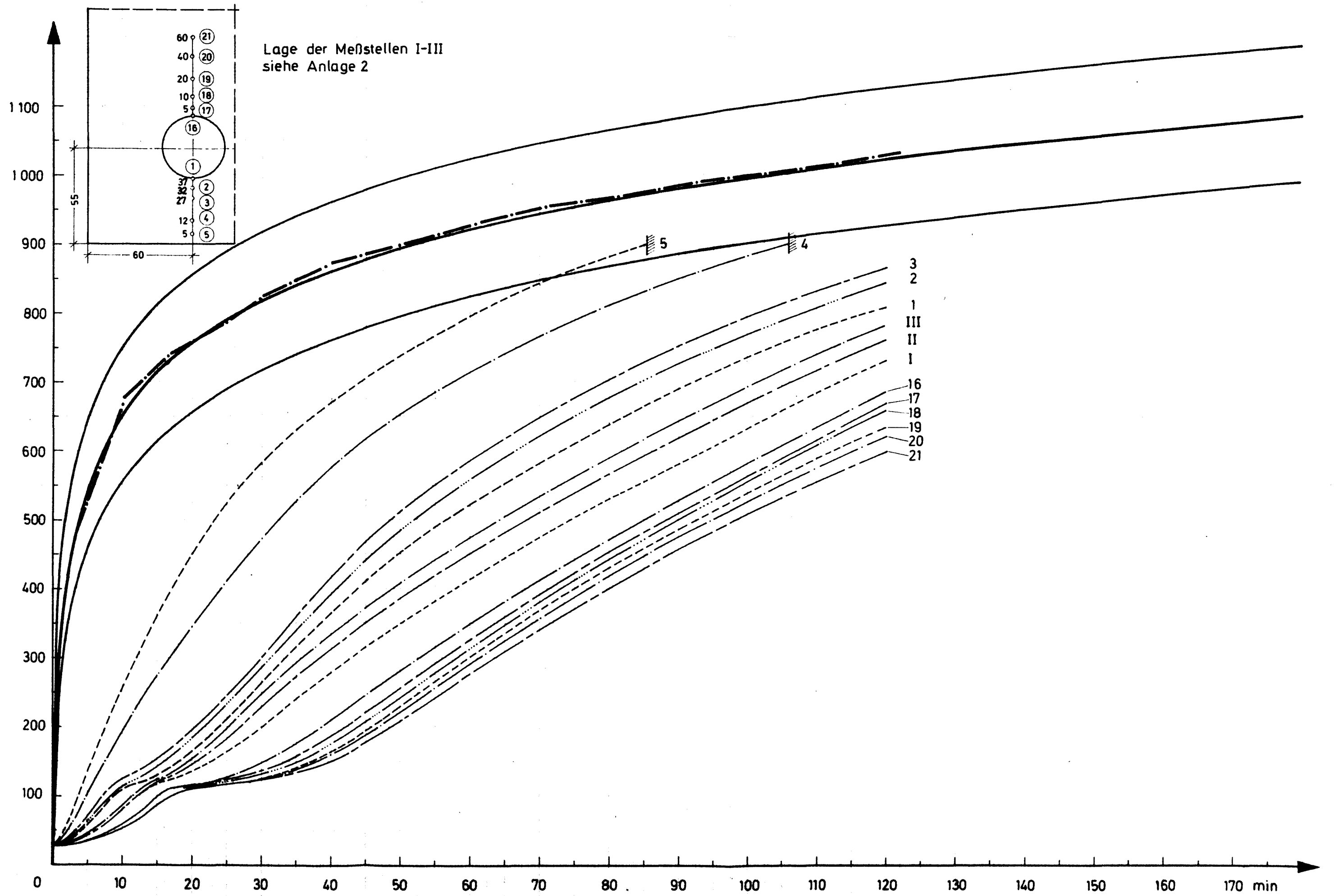






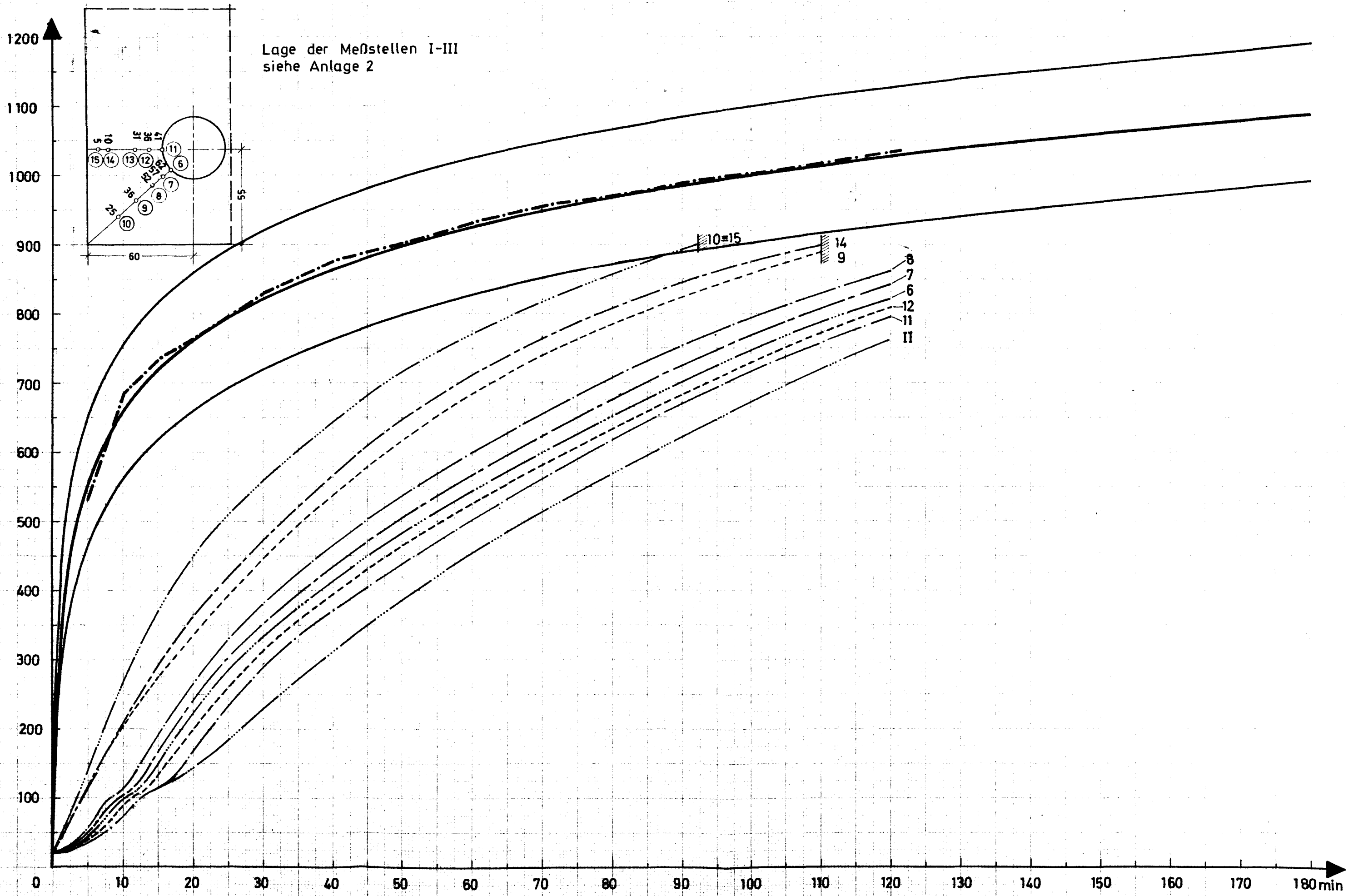
H.-Ø 45 mit 19 Spannstählen Ø 6  
Querschnitt 12/50

Anlage 4 c



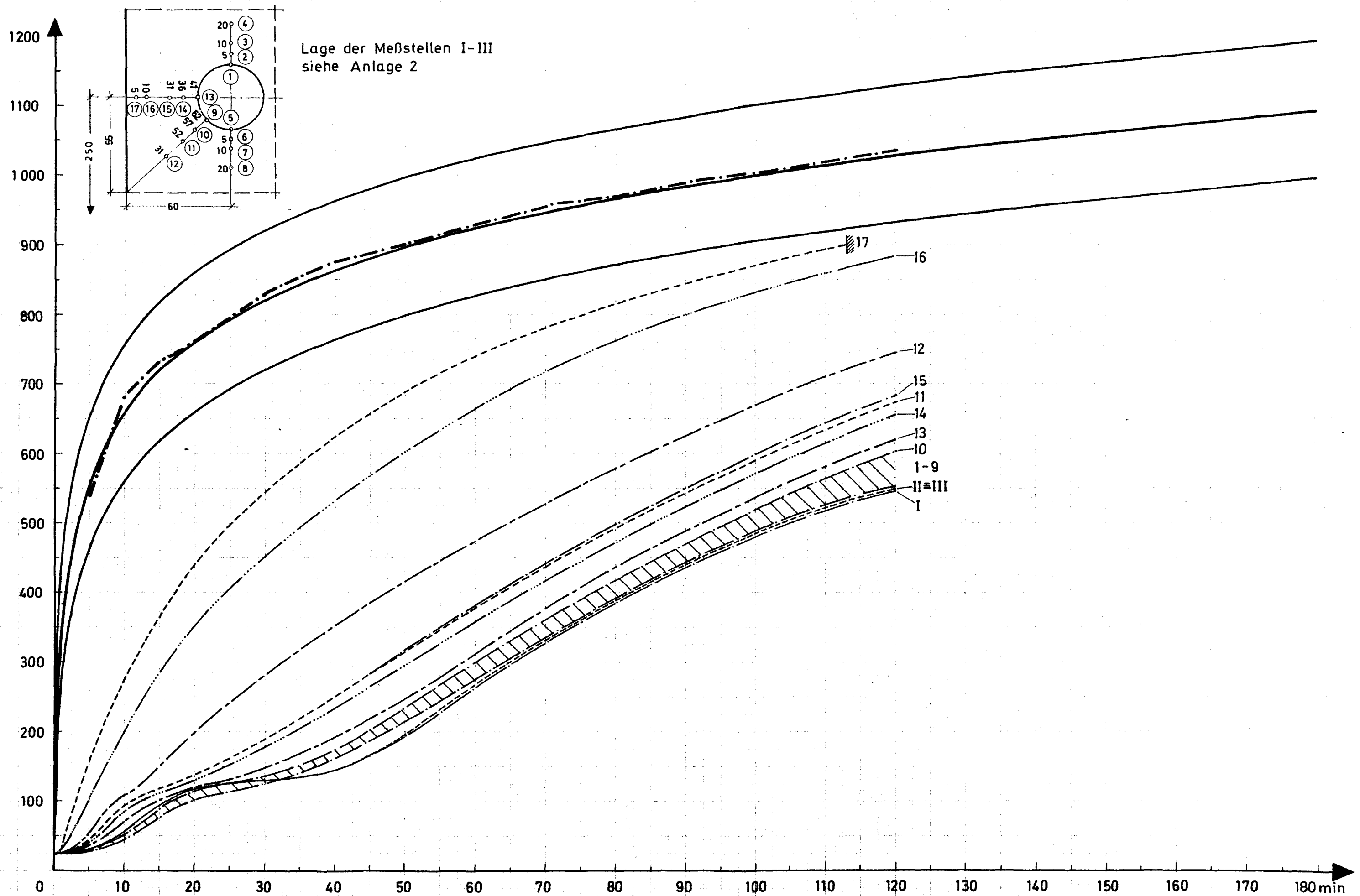
H.-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26  
Querschnitt 12/50

Anlage 5a



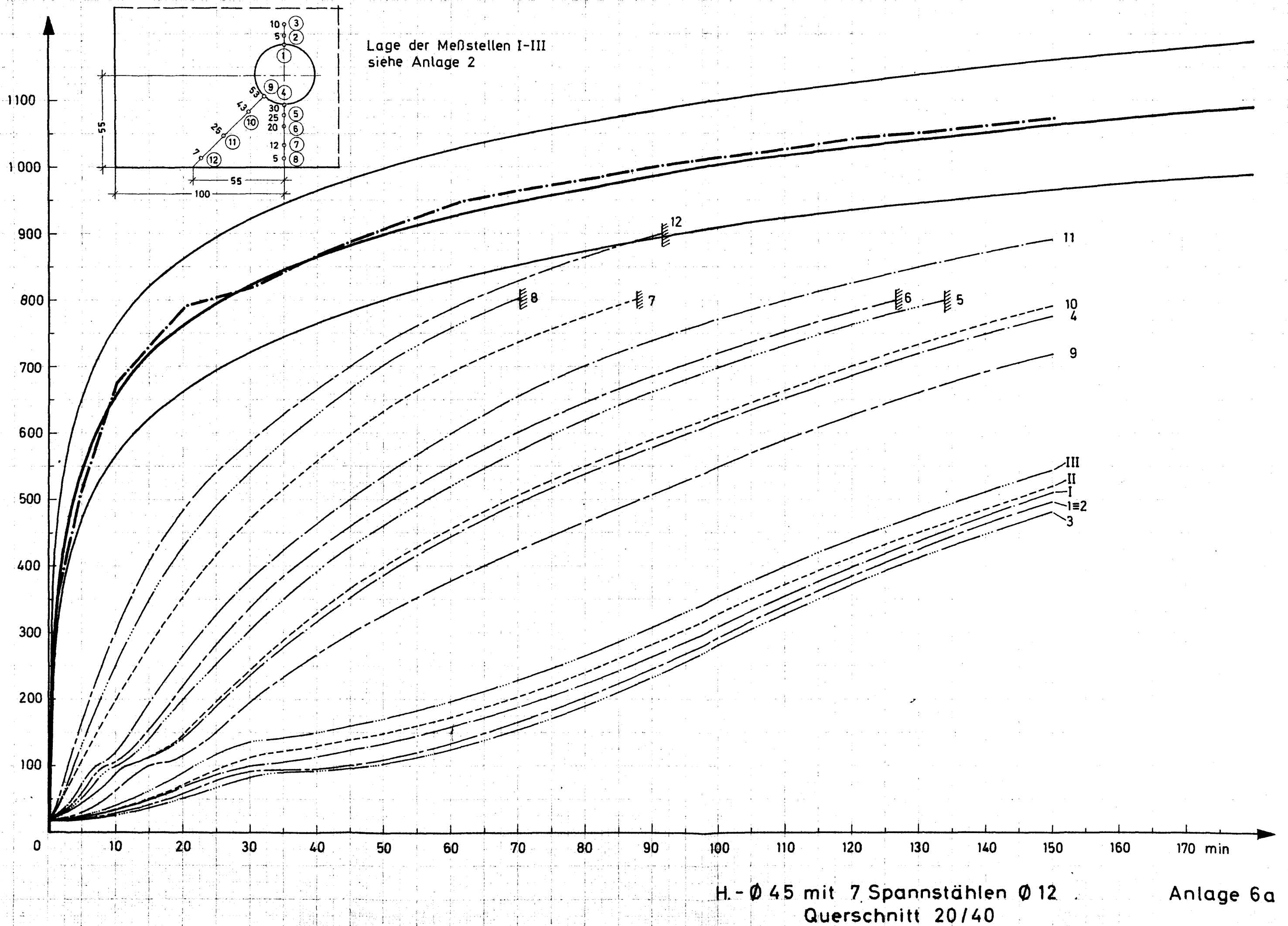
H-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26  
Querschnitt 12/50

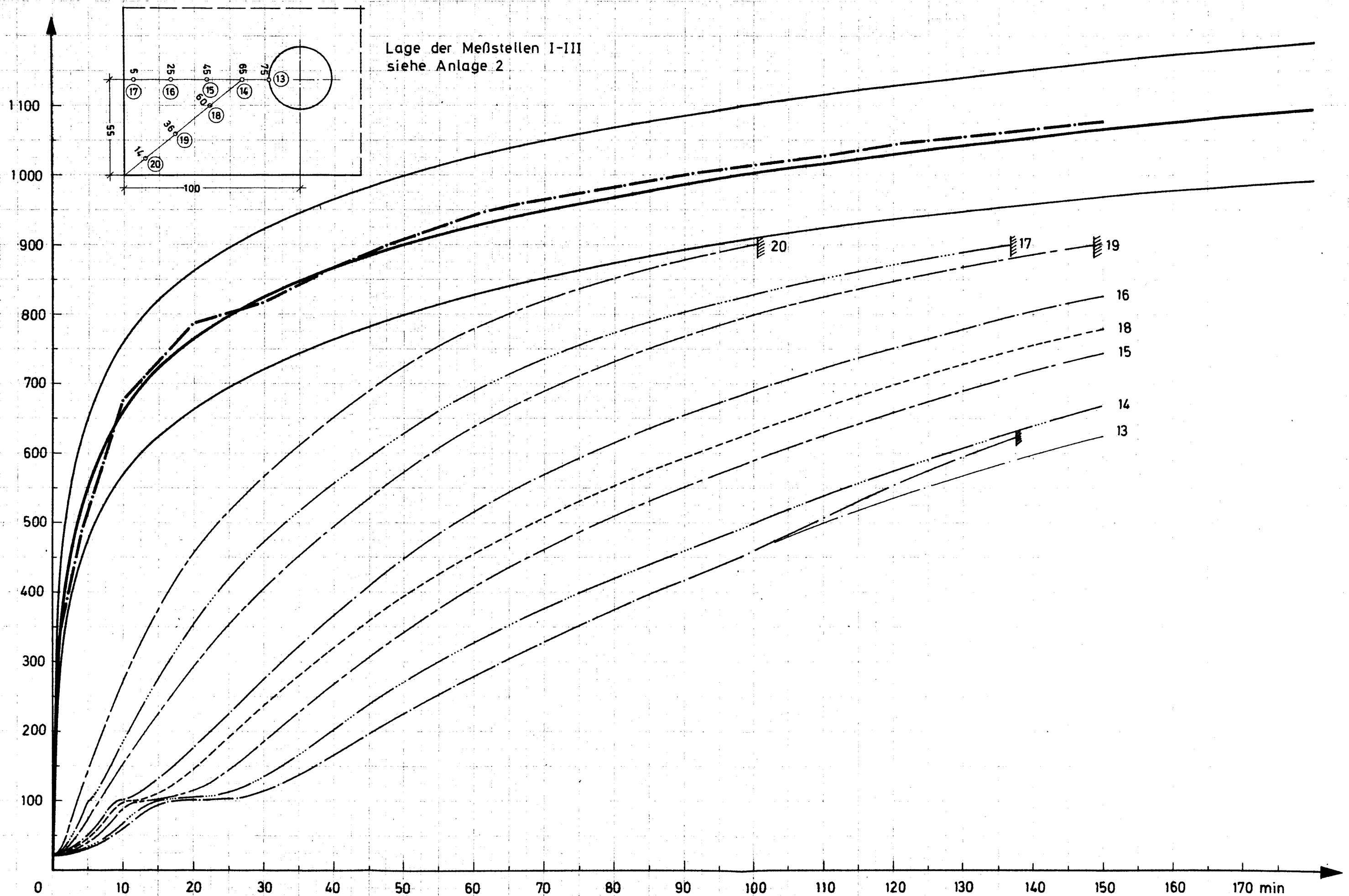
Anlage 5b



H.-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26  
Querschnitt 12/50

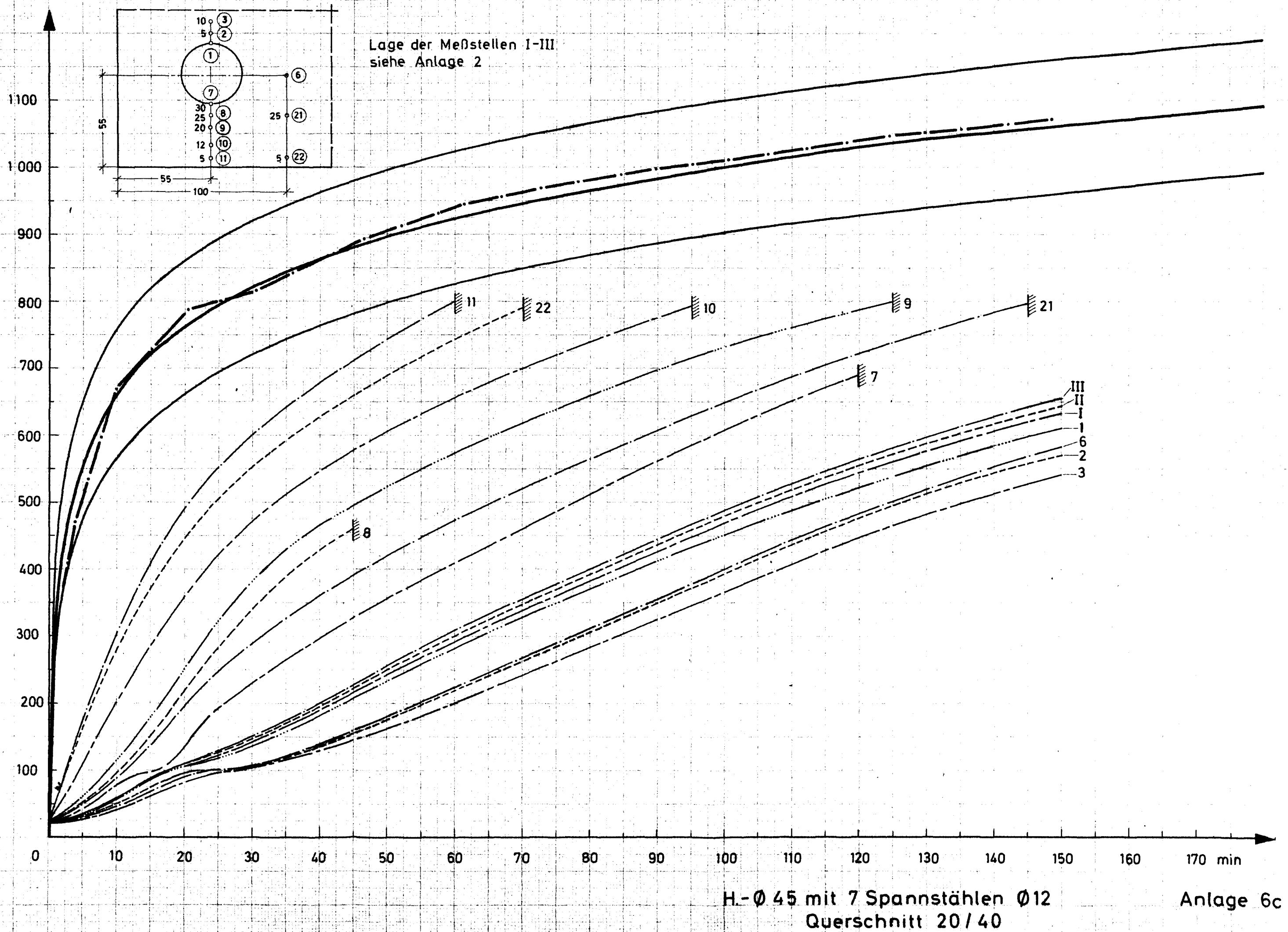
Anlage 5c

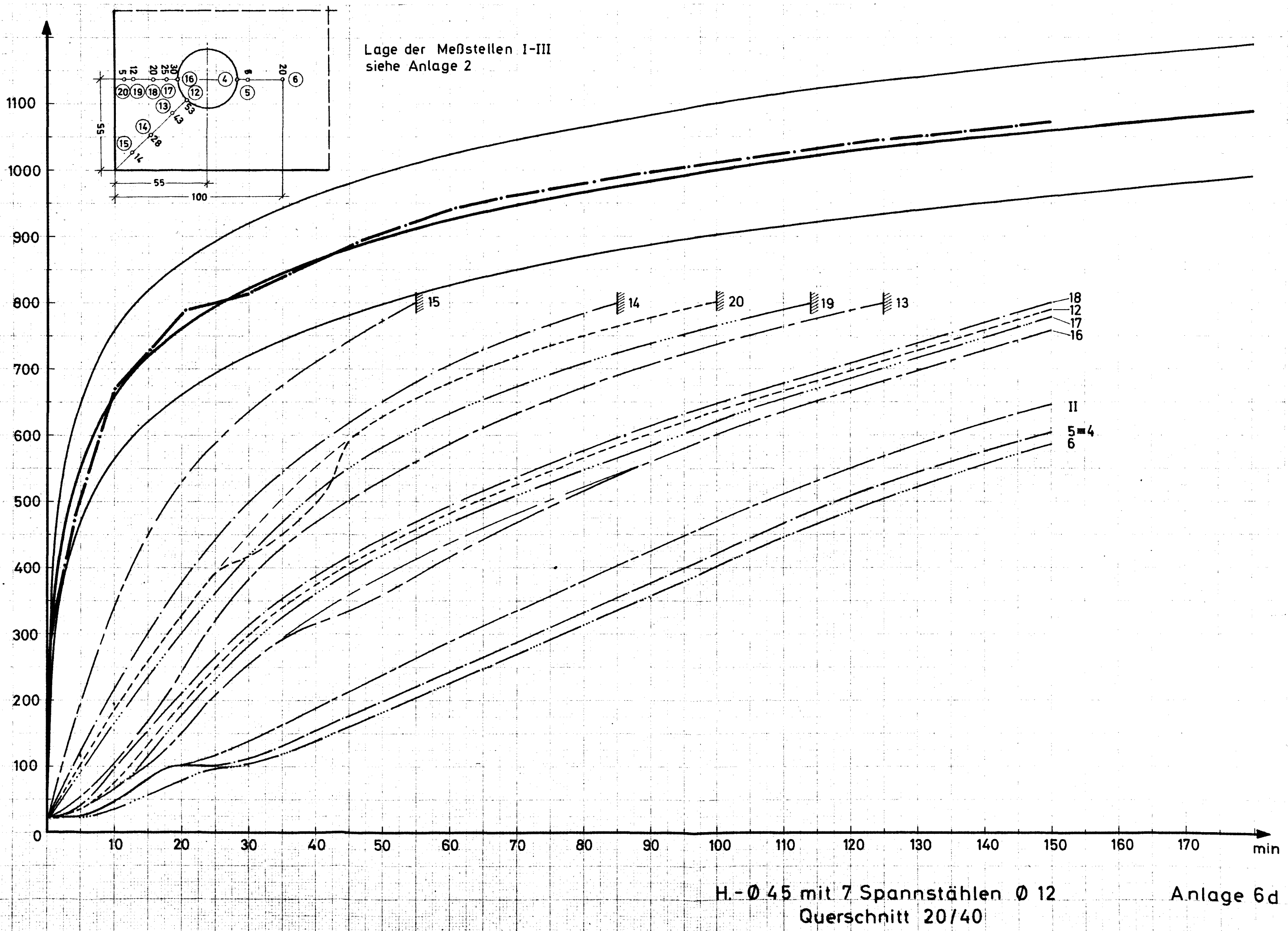




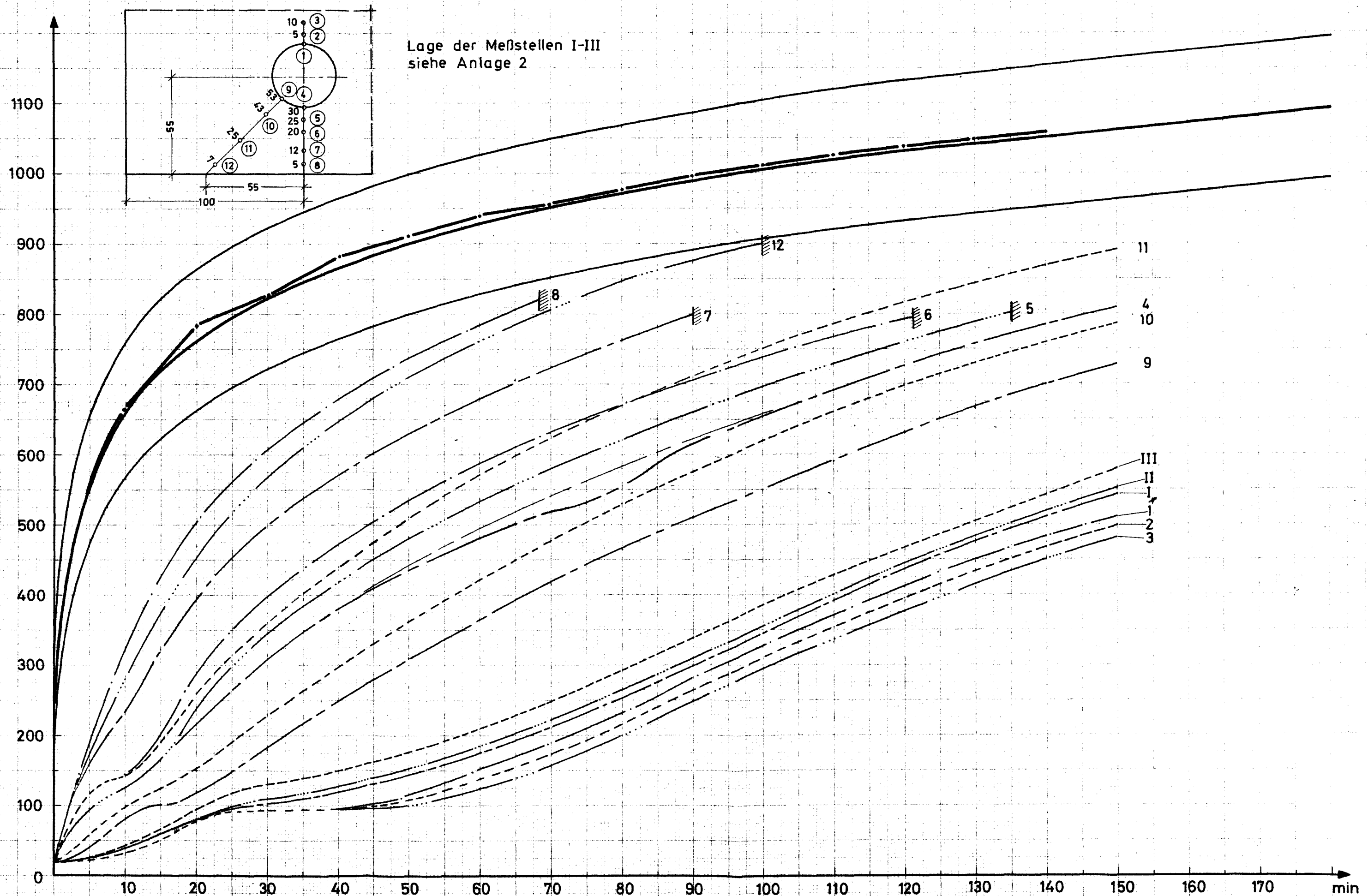
H.-Ø 45 mit 7 Spannstählen Ø 12  
Querschnitt 20/40

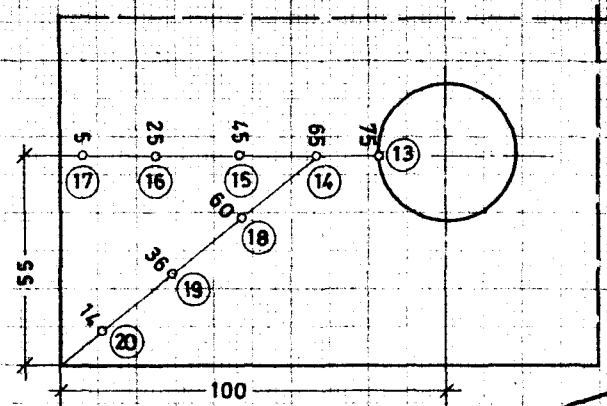
Anlage 6 b



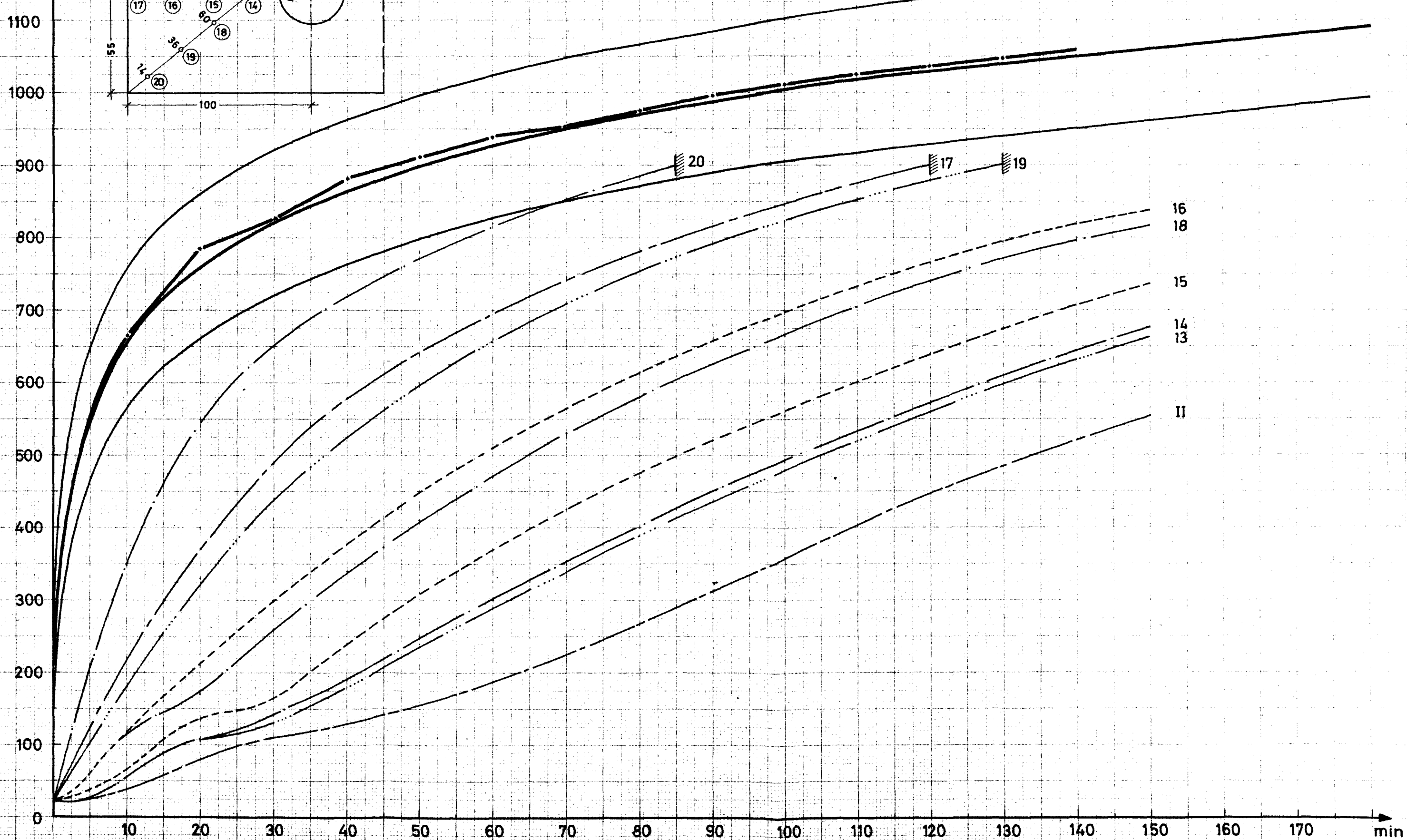






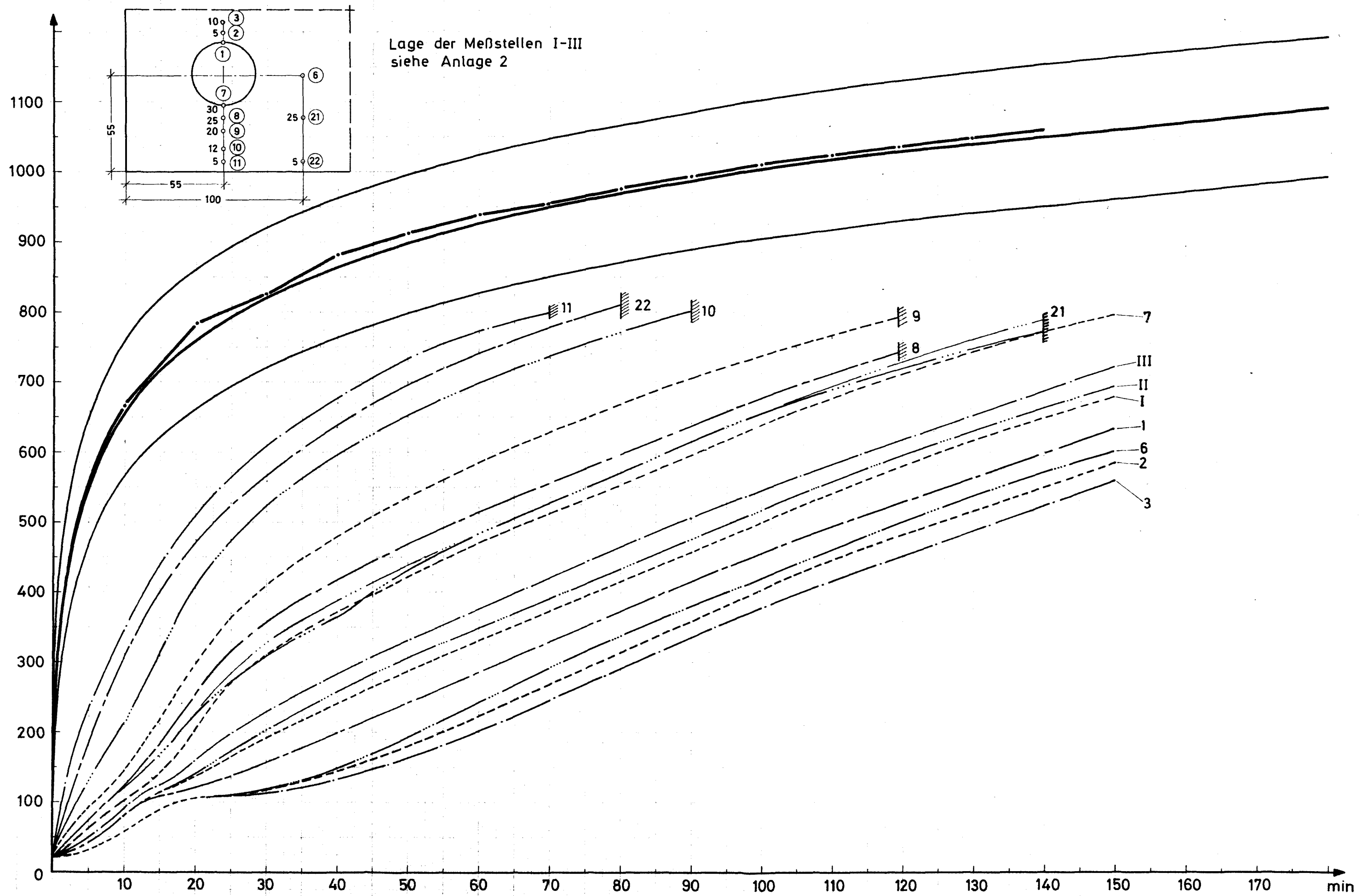


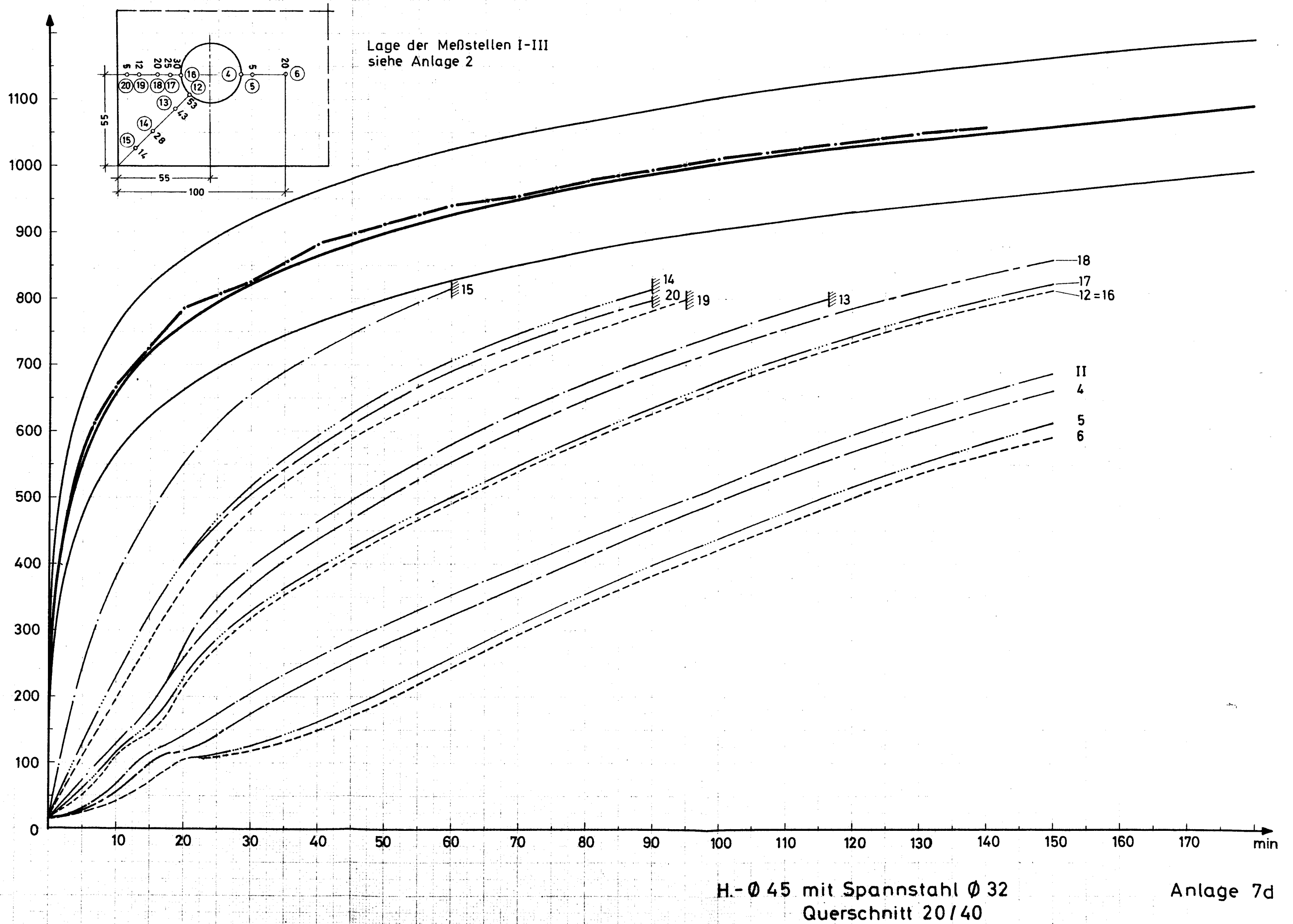
Lage der Meßstellen I-III  
siehe Anlage 2

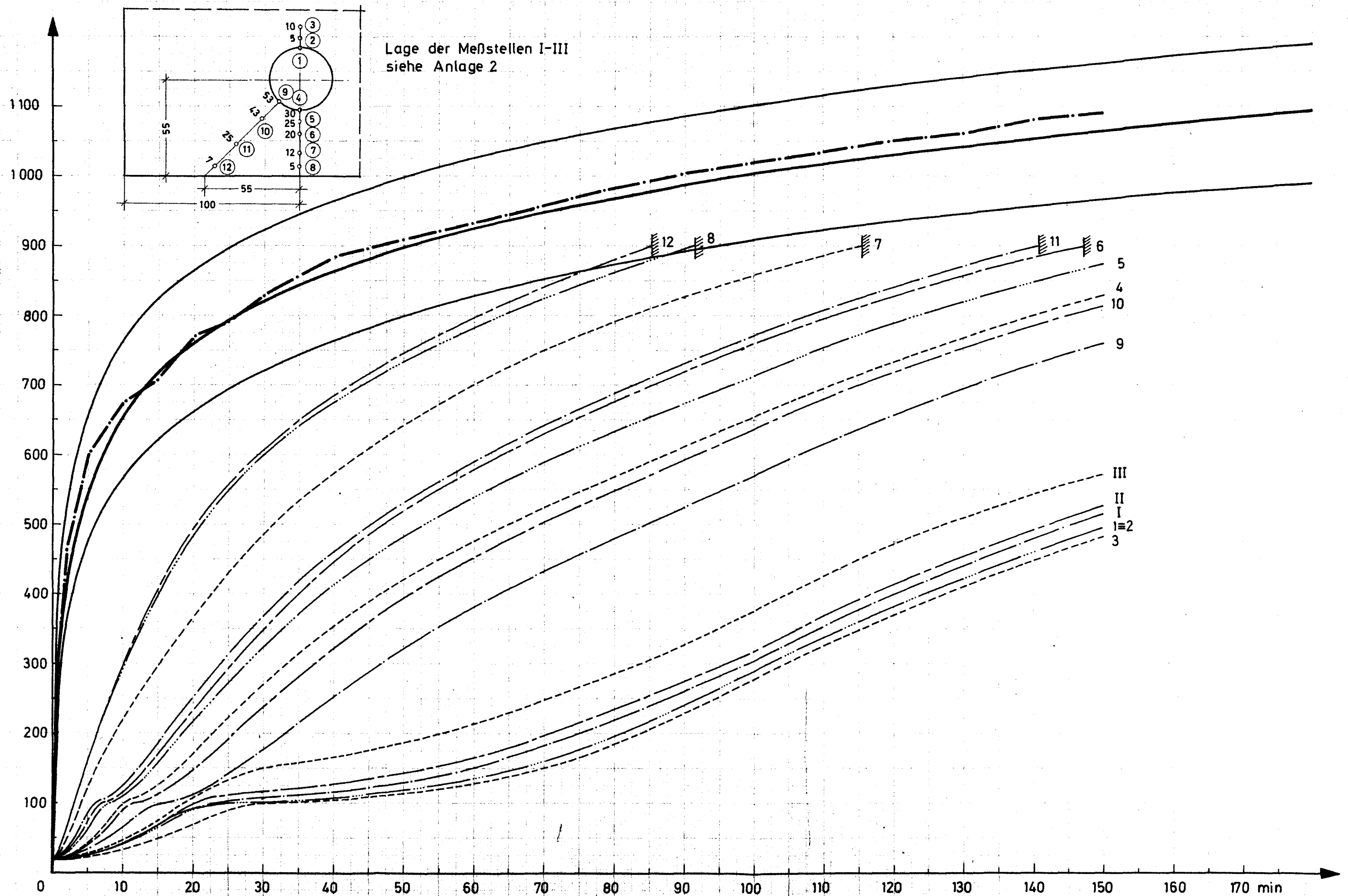


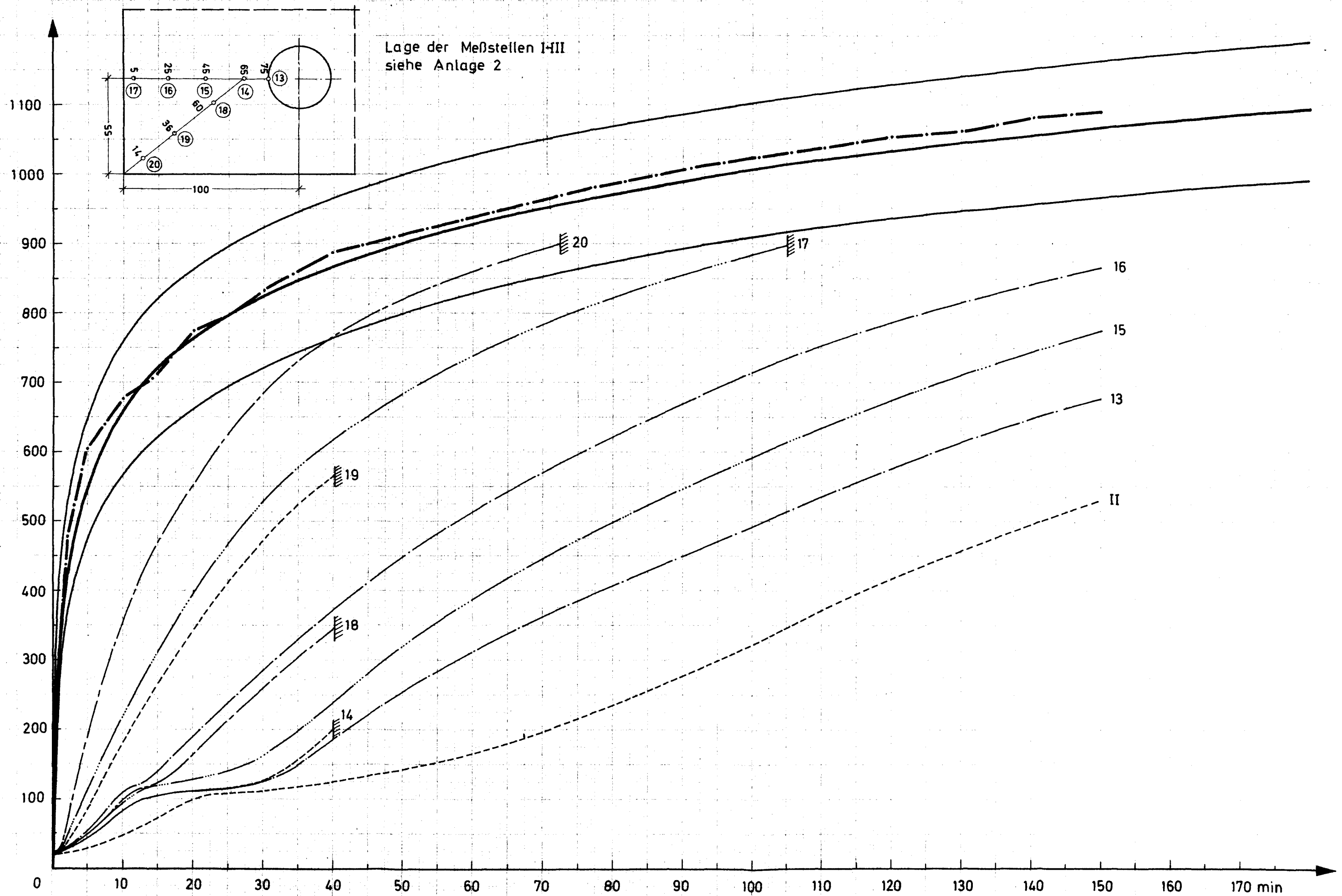
H-Ø 45 mit Spannstahl Ø 32  
Querschnitt 20/40

Anlage 7b



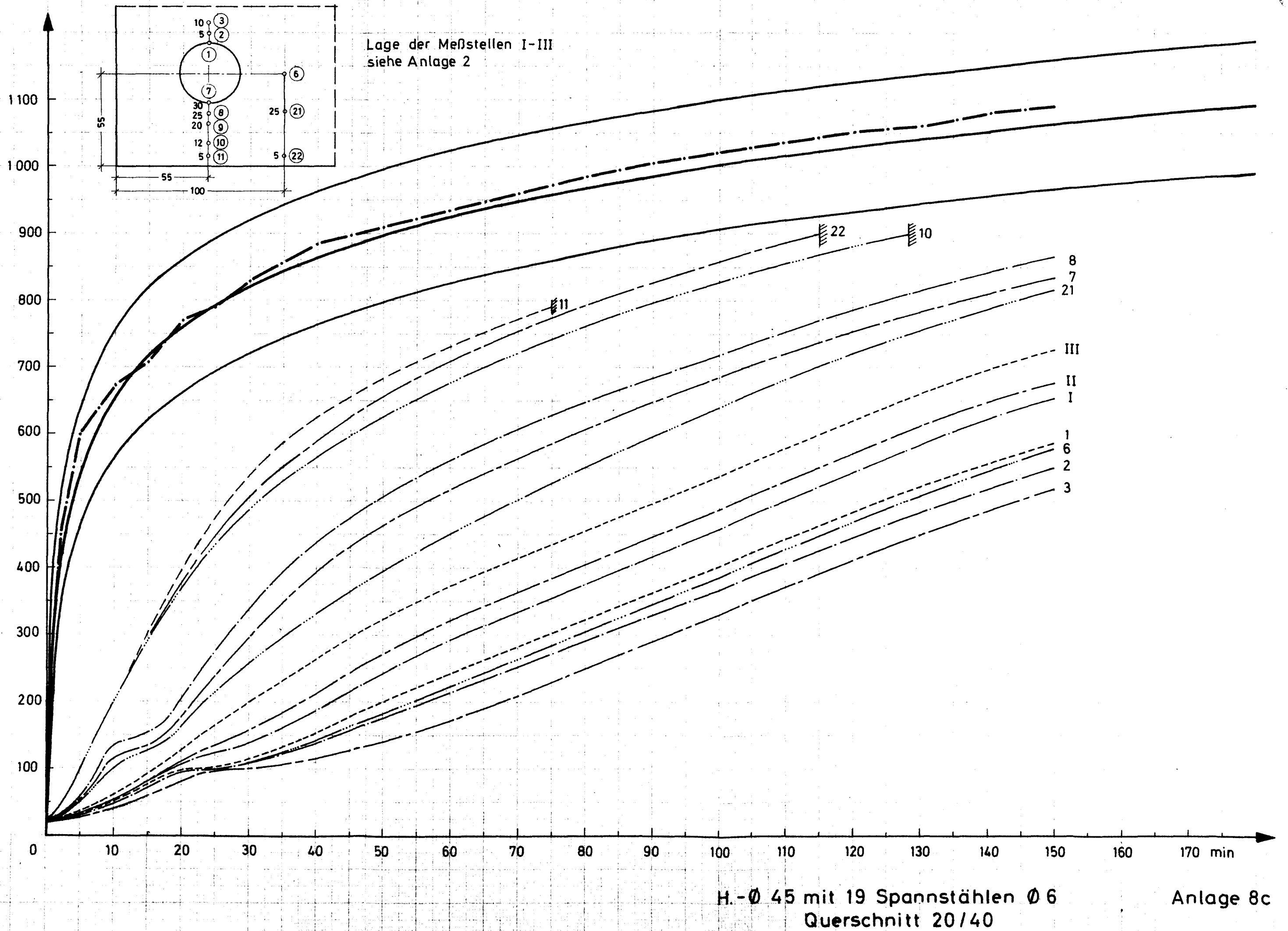


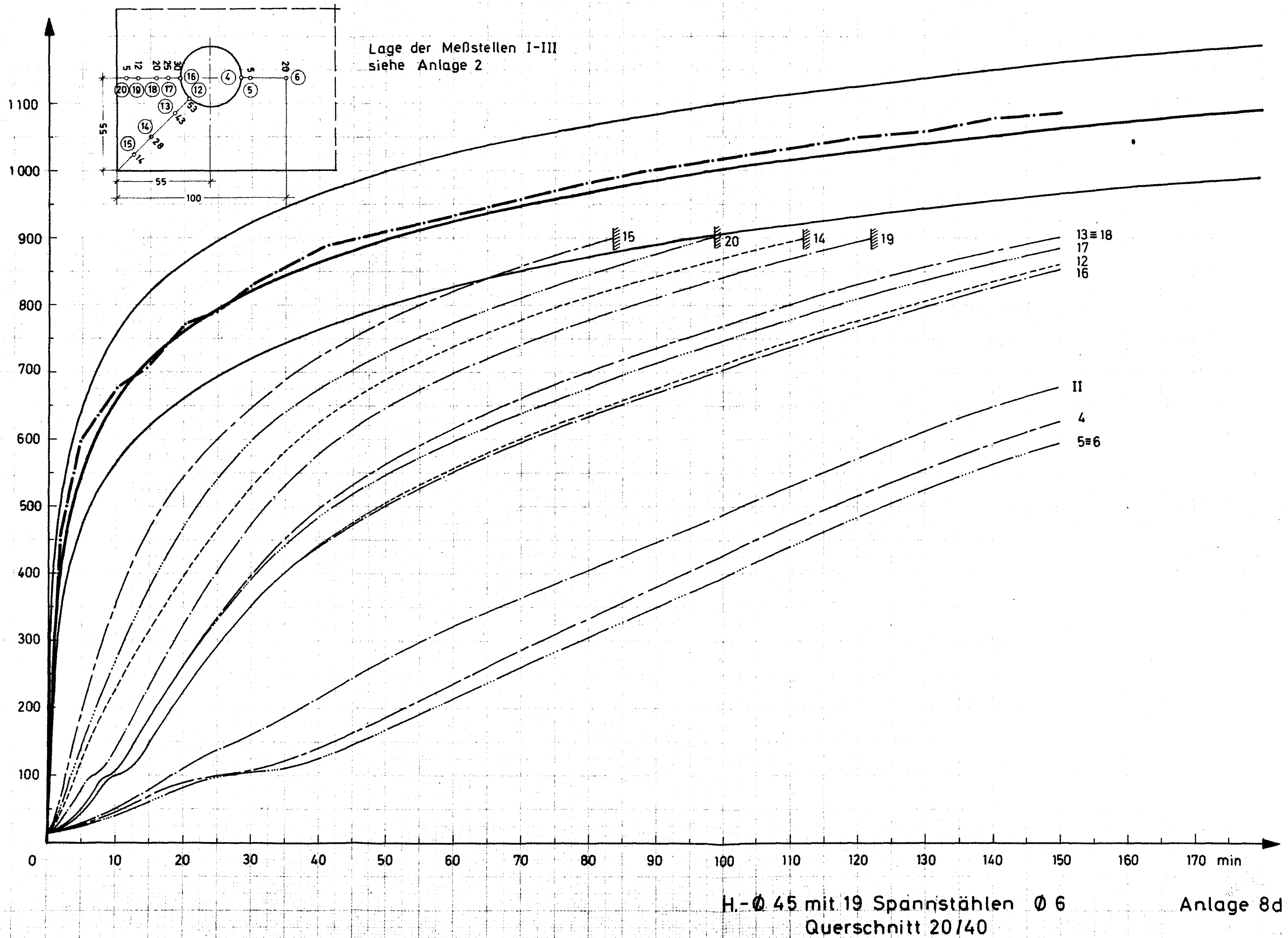




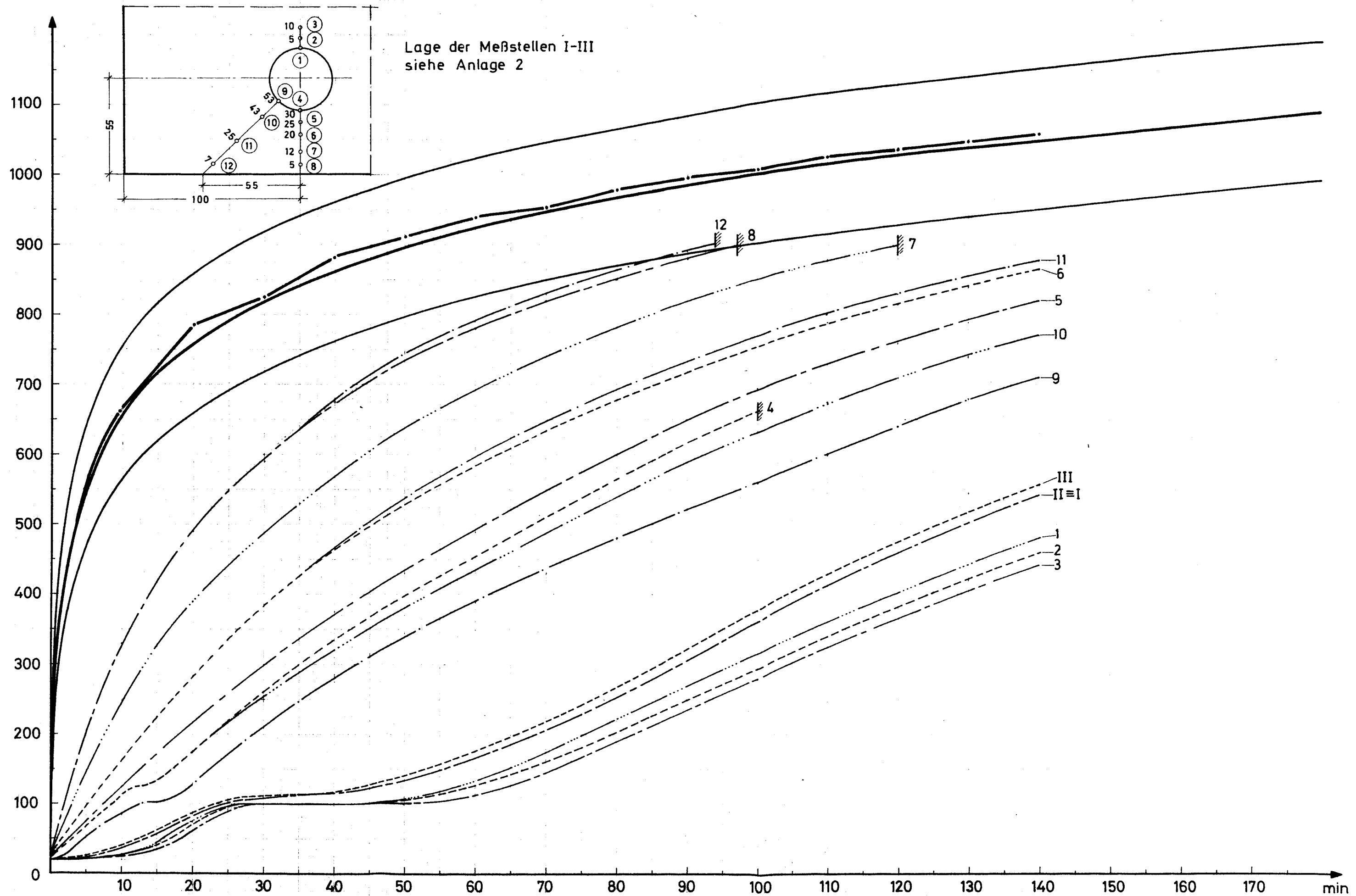
H.-Ø 45 mit 19 Spannstählen Ø 6  
Querschnitt 20/40

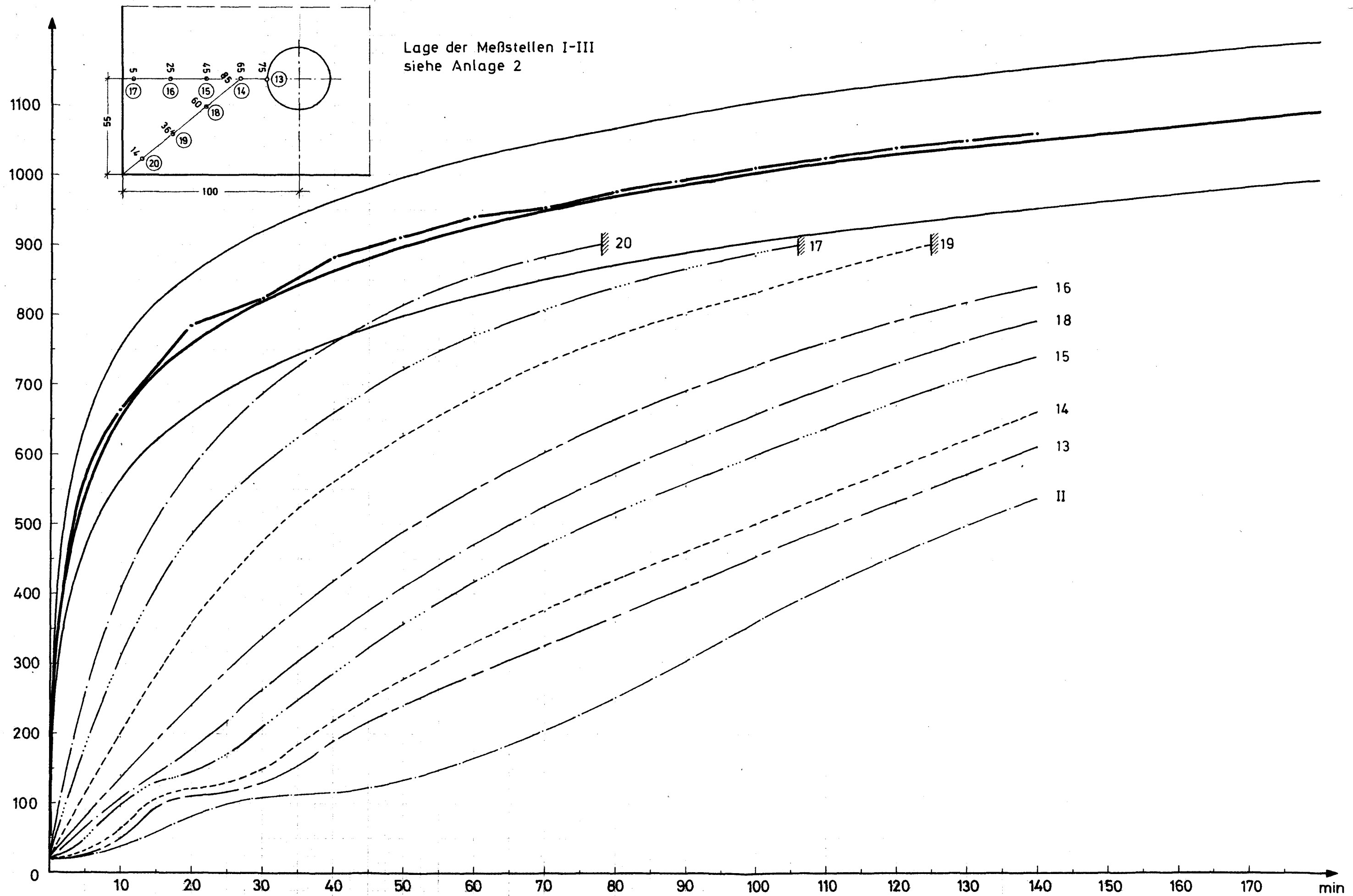
Anlage 8b





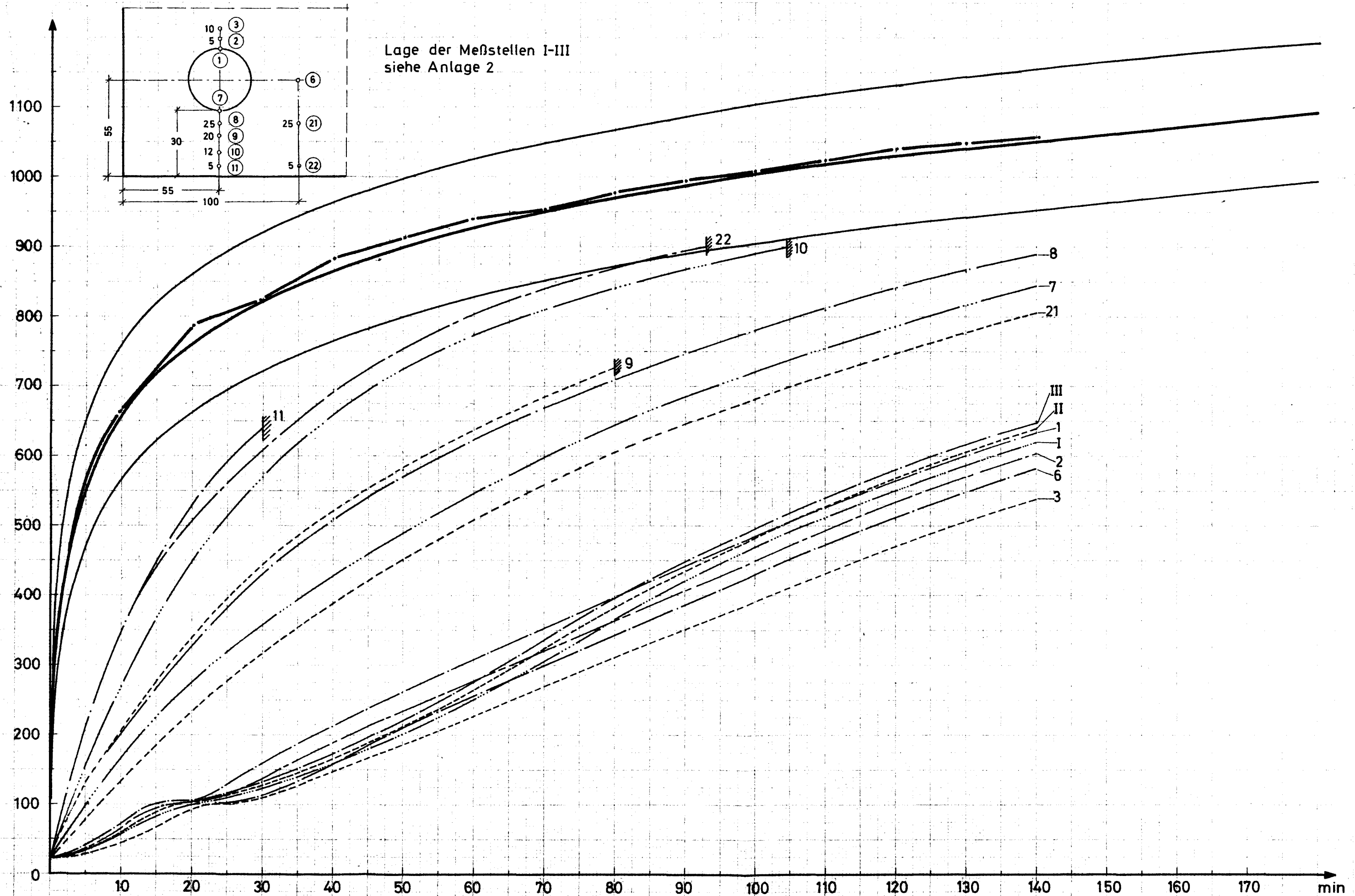






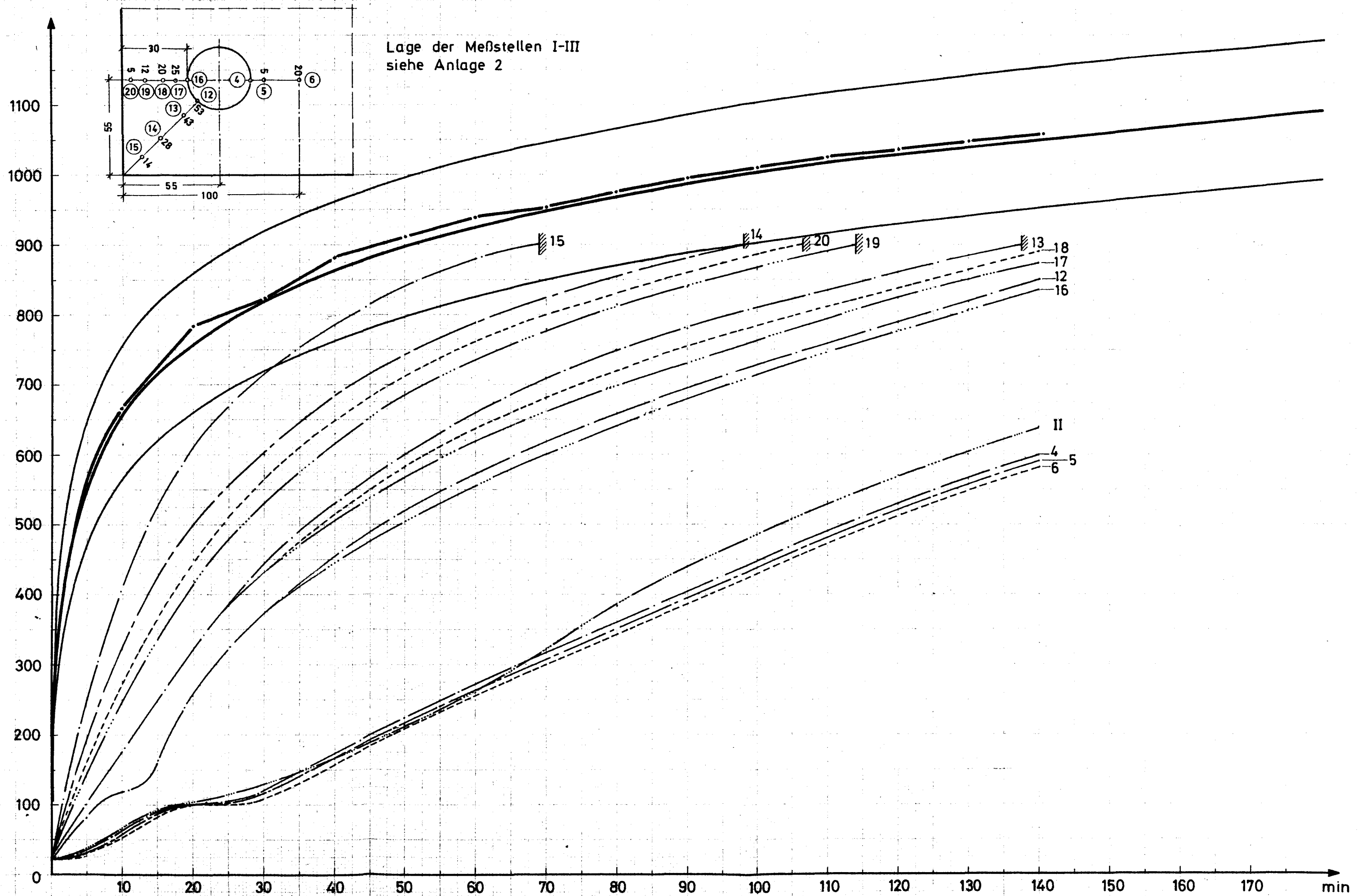
H.- $\emptyset$  45 mit Spannstahl  $\emptyset$  26  
Querschnitt 20/40

Anlage 9b



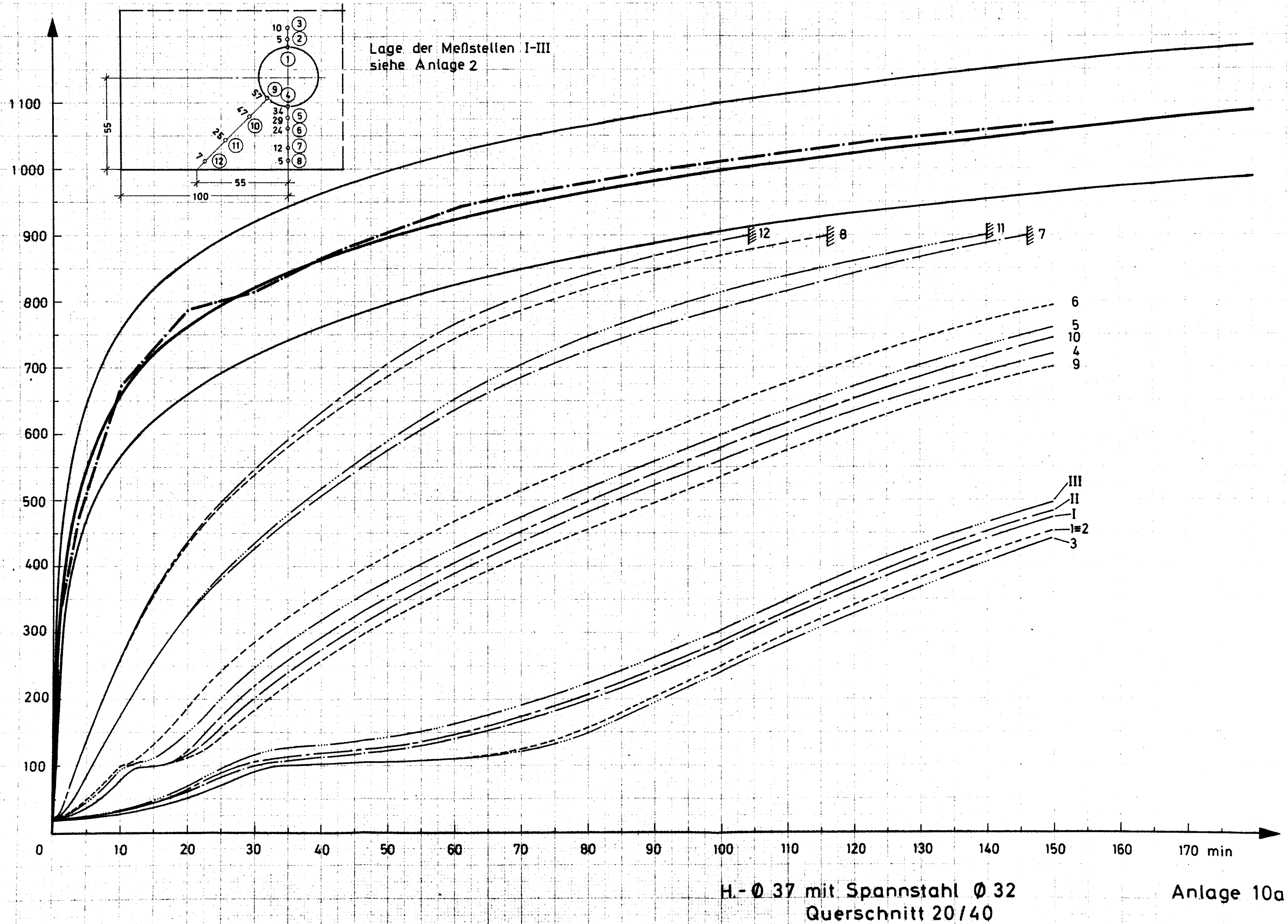
H-Ø 45 mit Spannstahl Ø 26  
Querschnitt 20/40

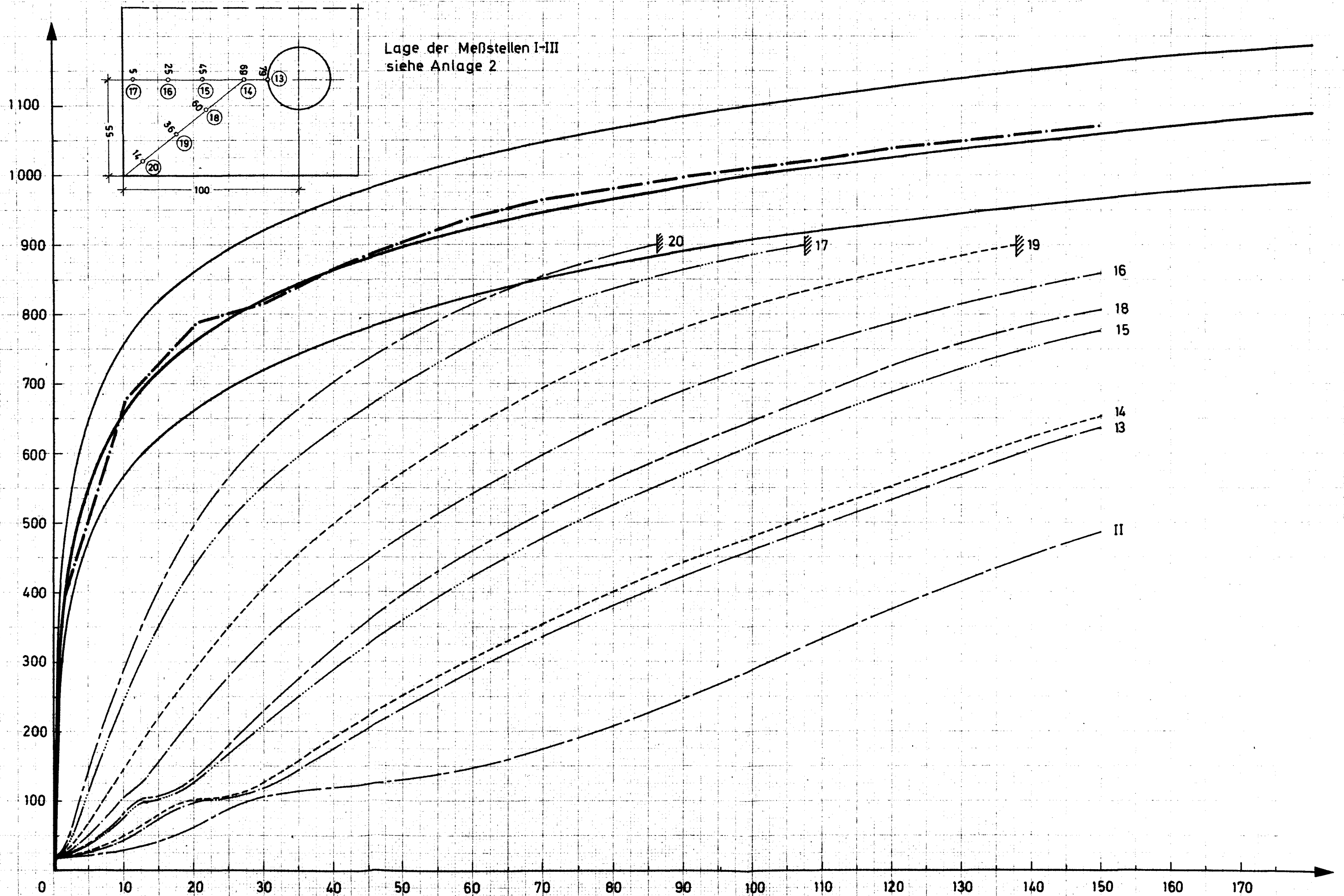
Anlage 9c



H.-Ø 45 mit Spannstahl Ø 26  
Querschnitt 20/40

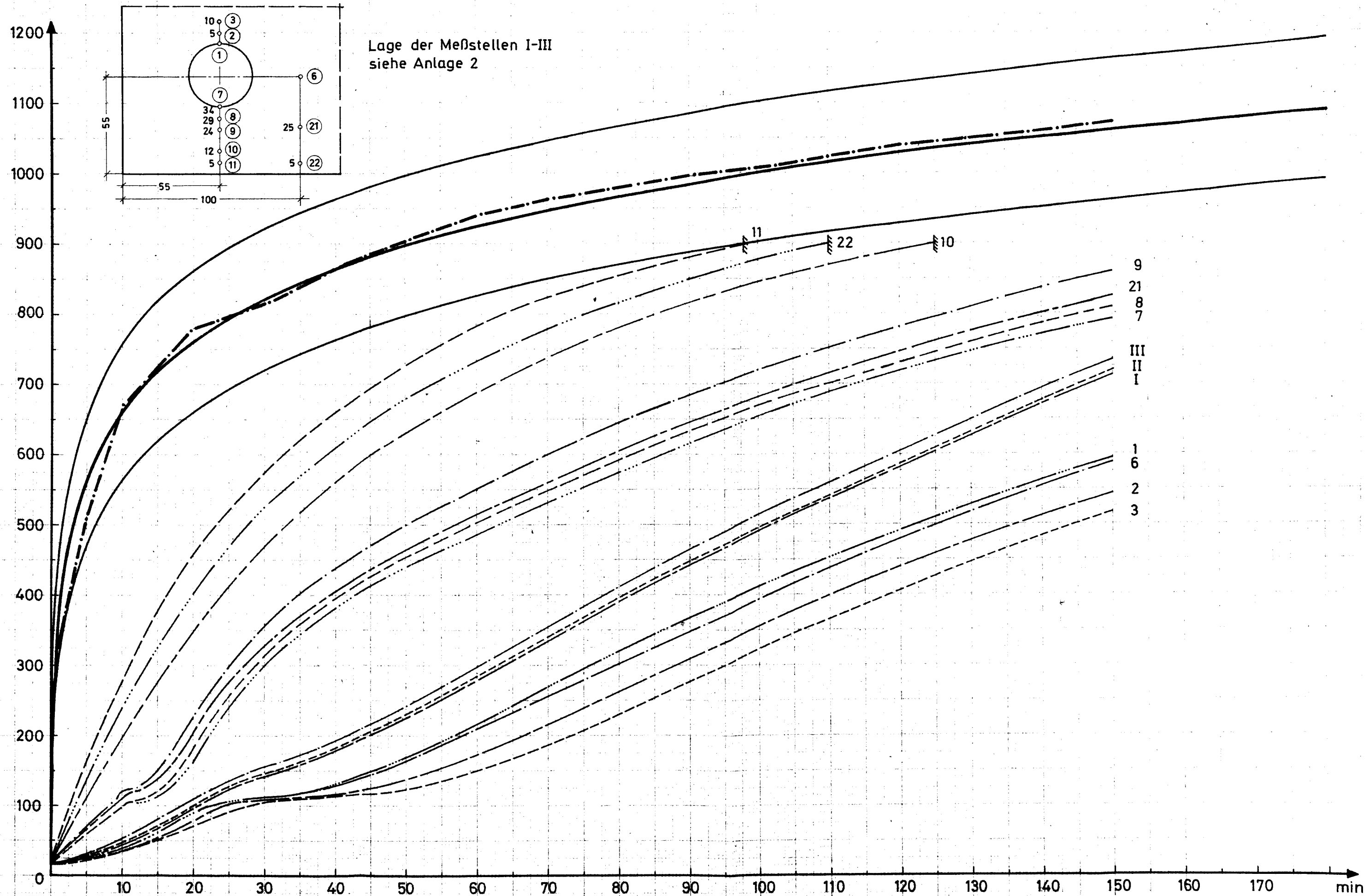
Anlage 9d





H.-Ø 37 mit Spannstahl Ø 32  
Querschnitt 20/40

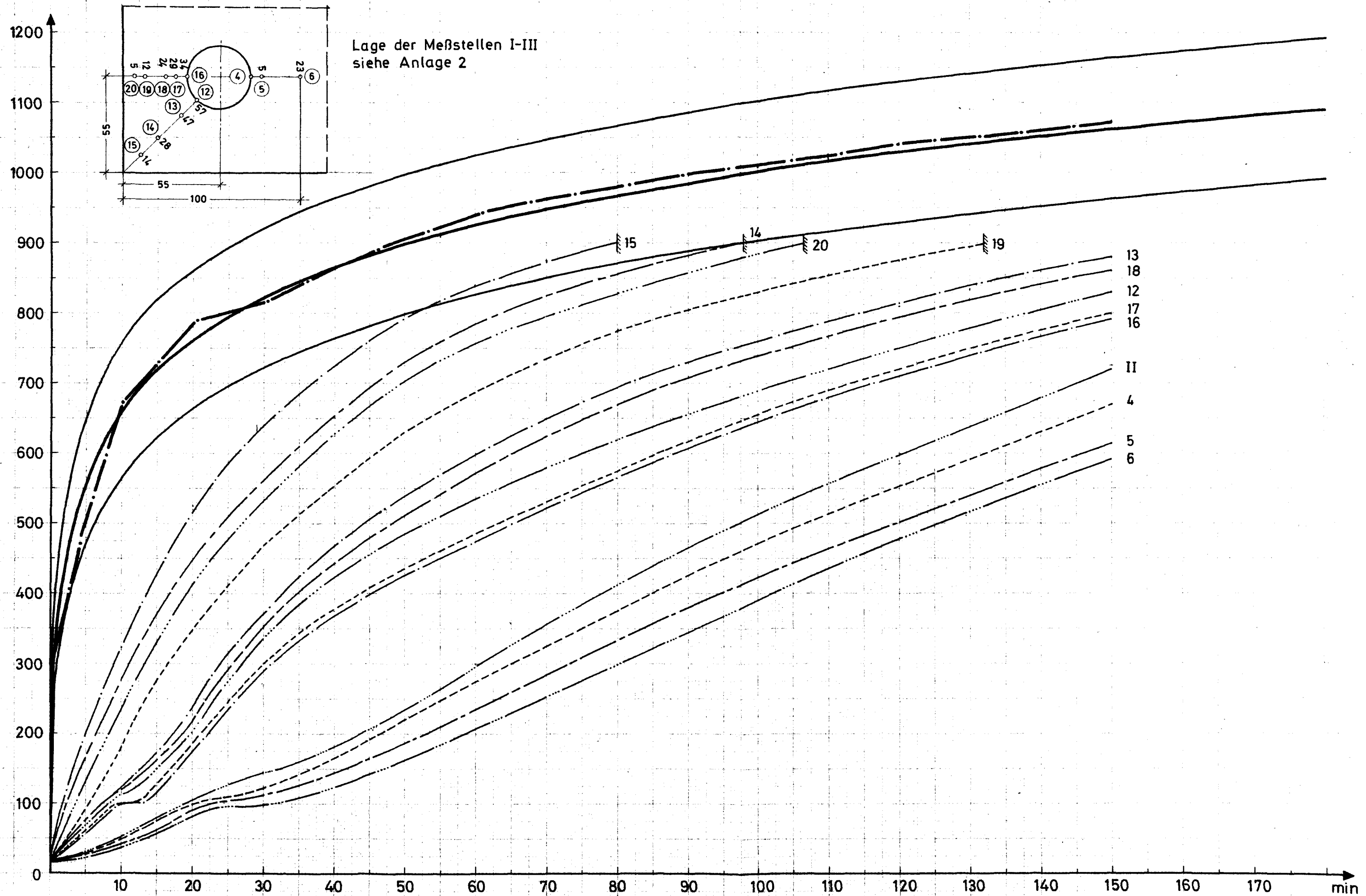
Anlage 10b



H.-Ø 37 mit Spannstahl Ø 32  
Querschnitt 20/40

Anlage 10c

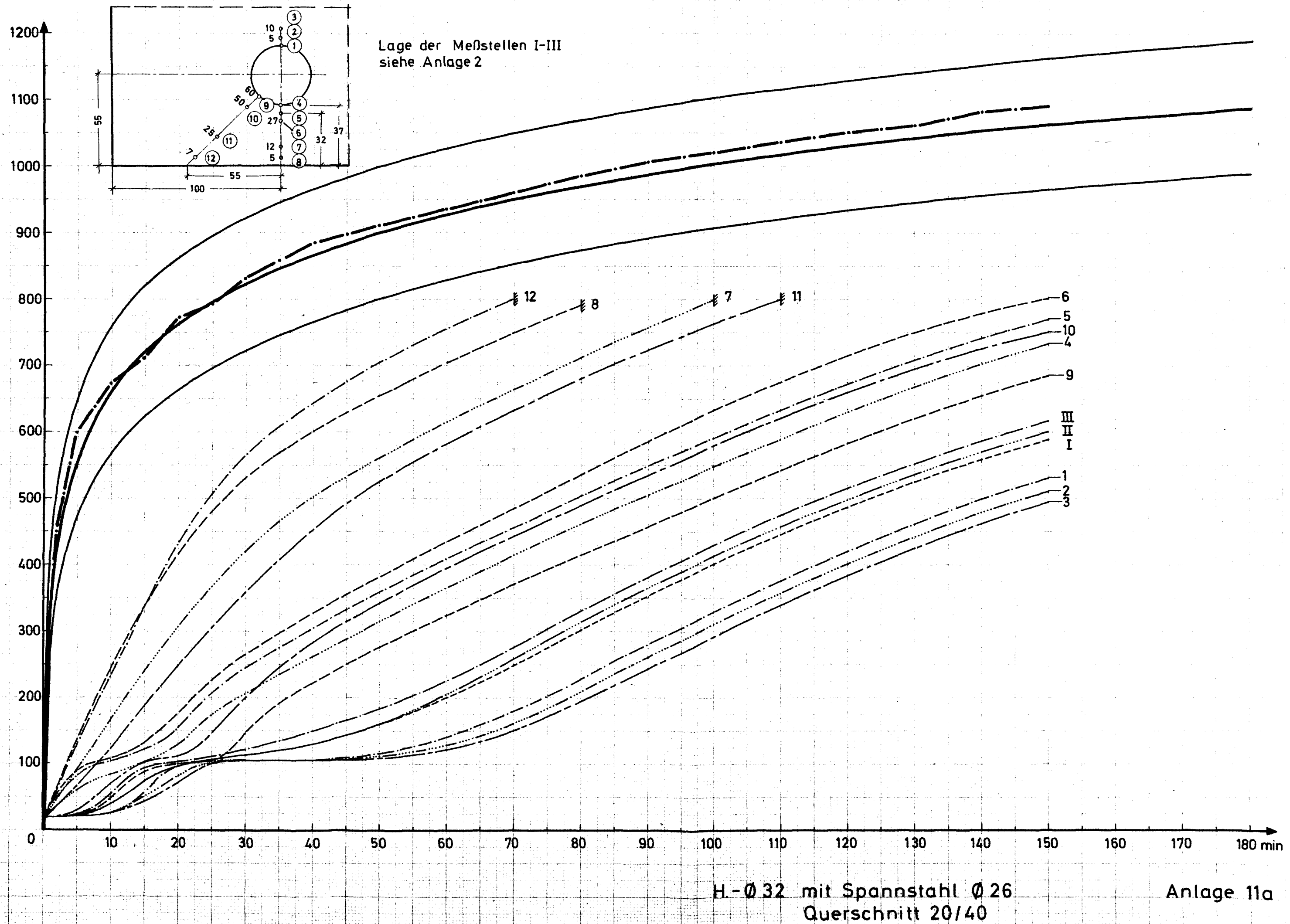


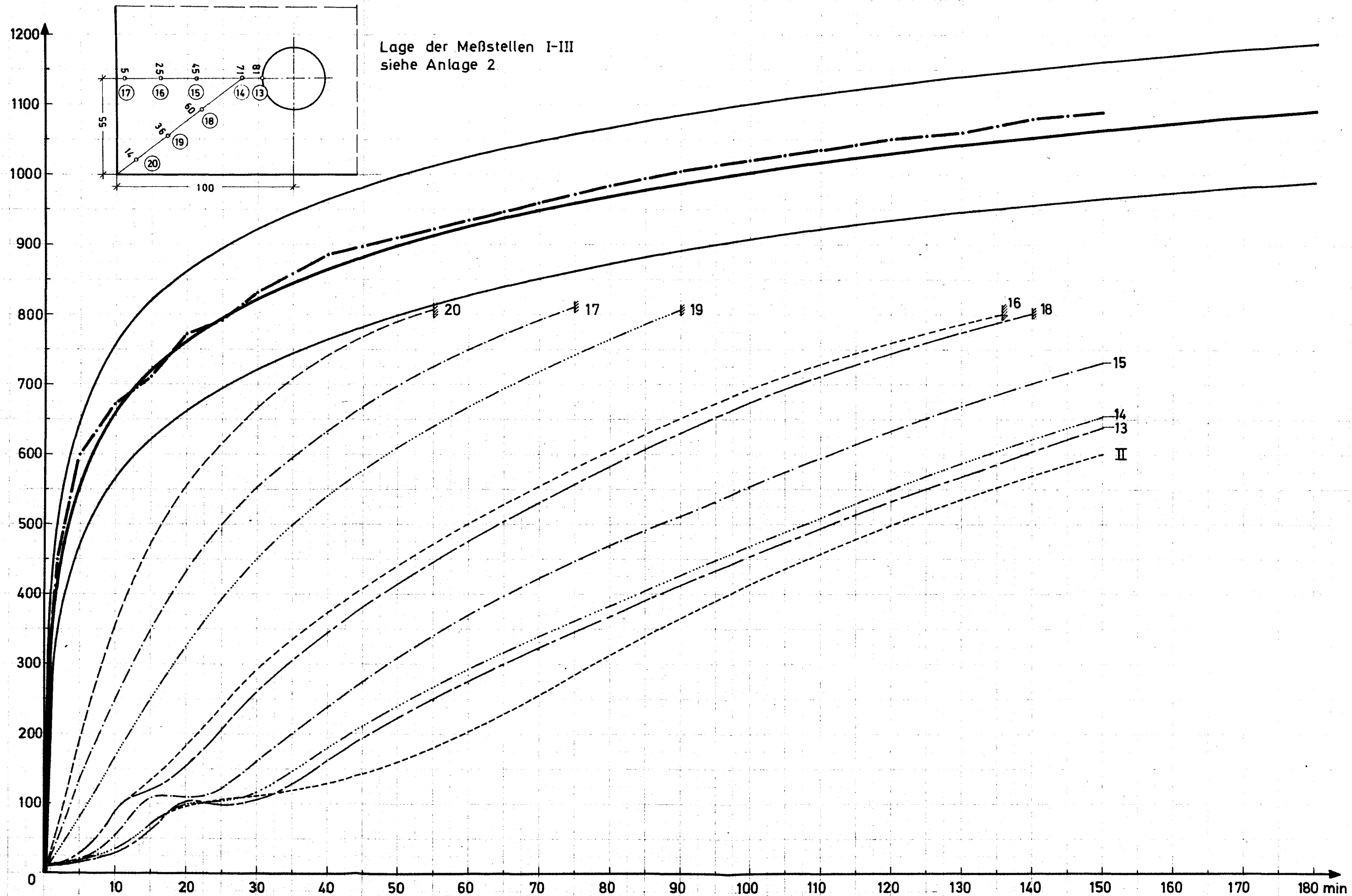


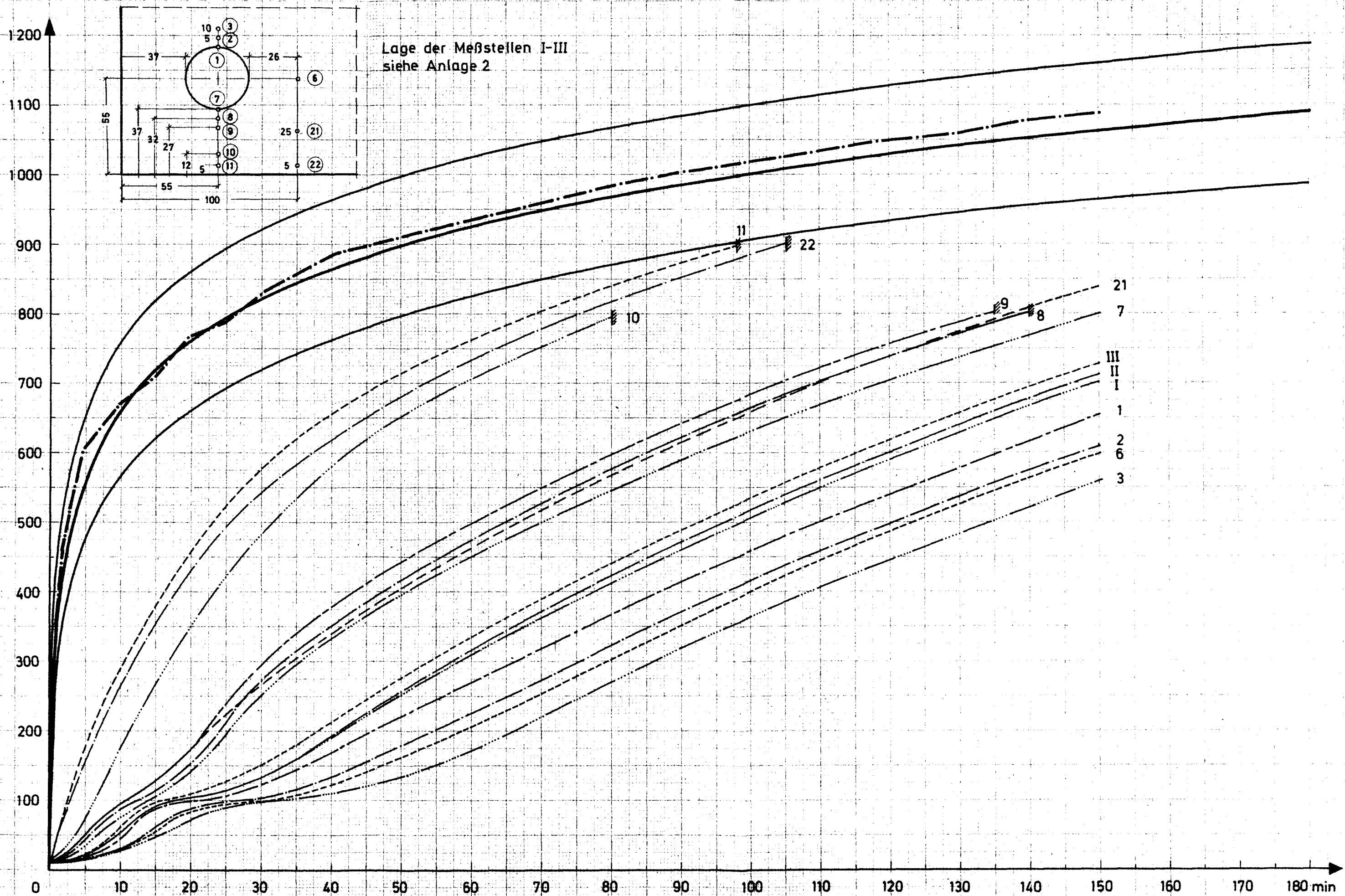
H.-Ø 37 mit Spannstahl Ø 32  
Querschnitt 20/40

Anlage 10d



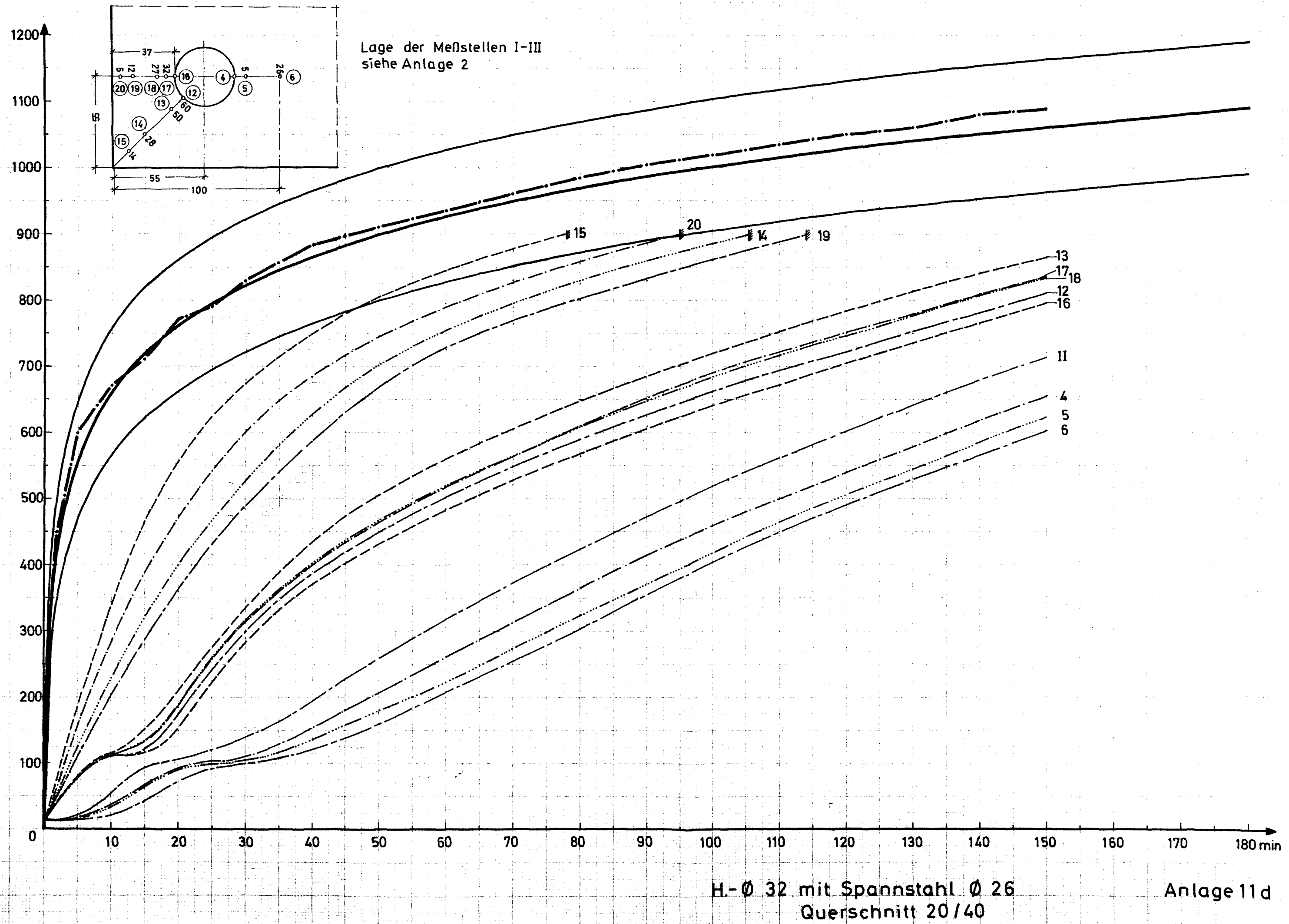


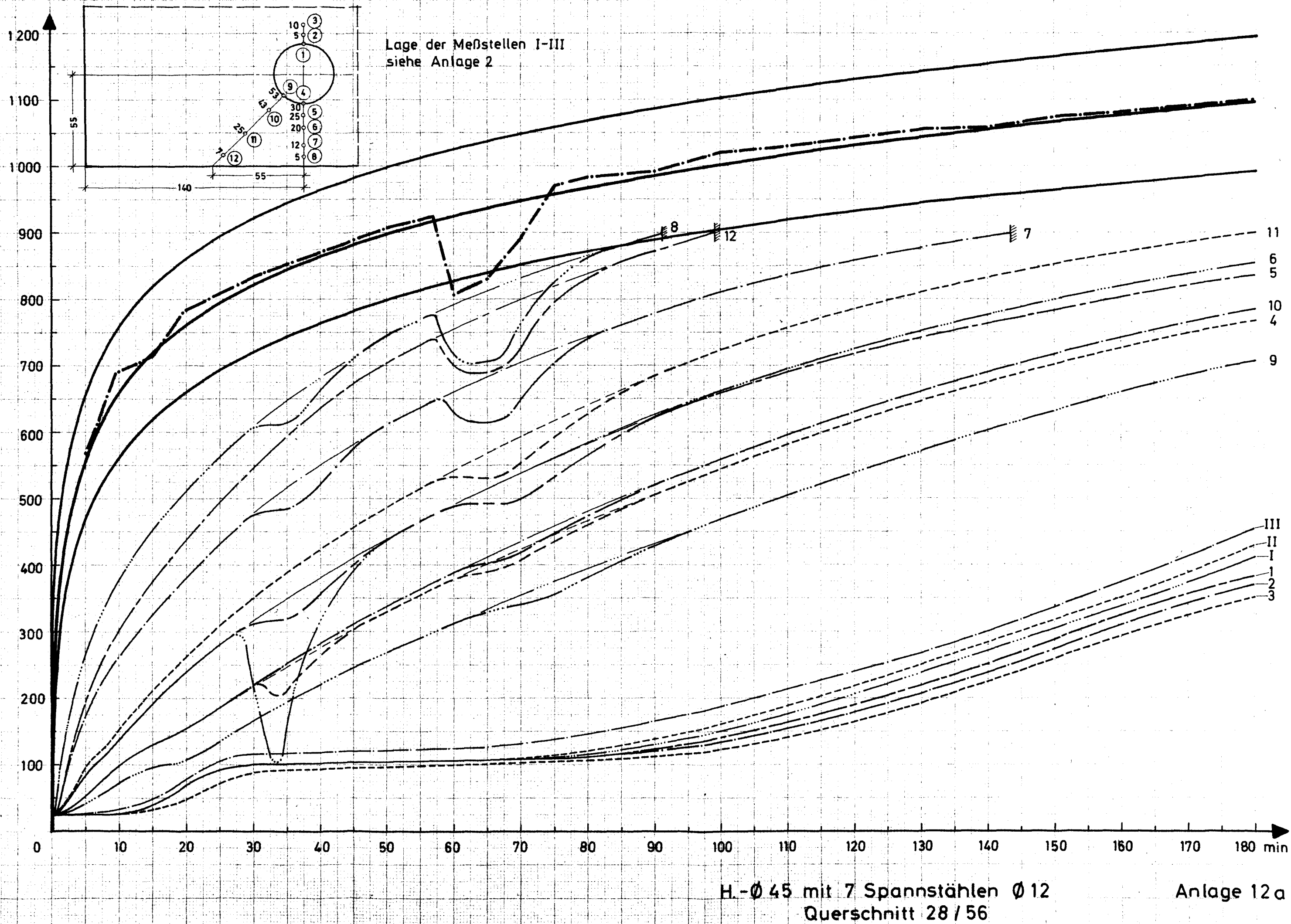


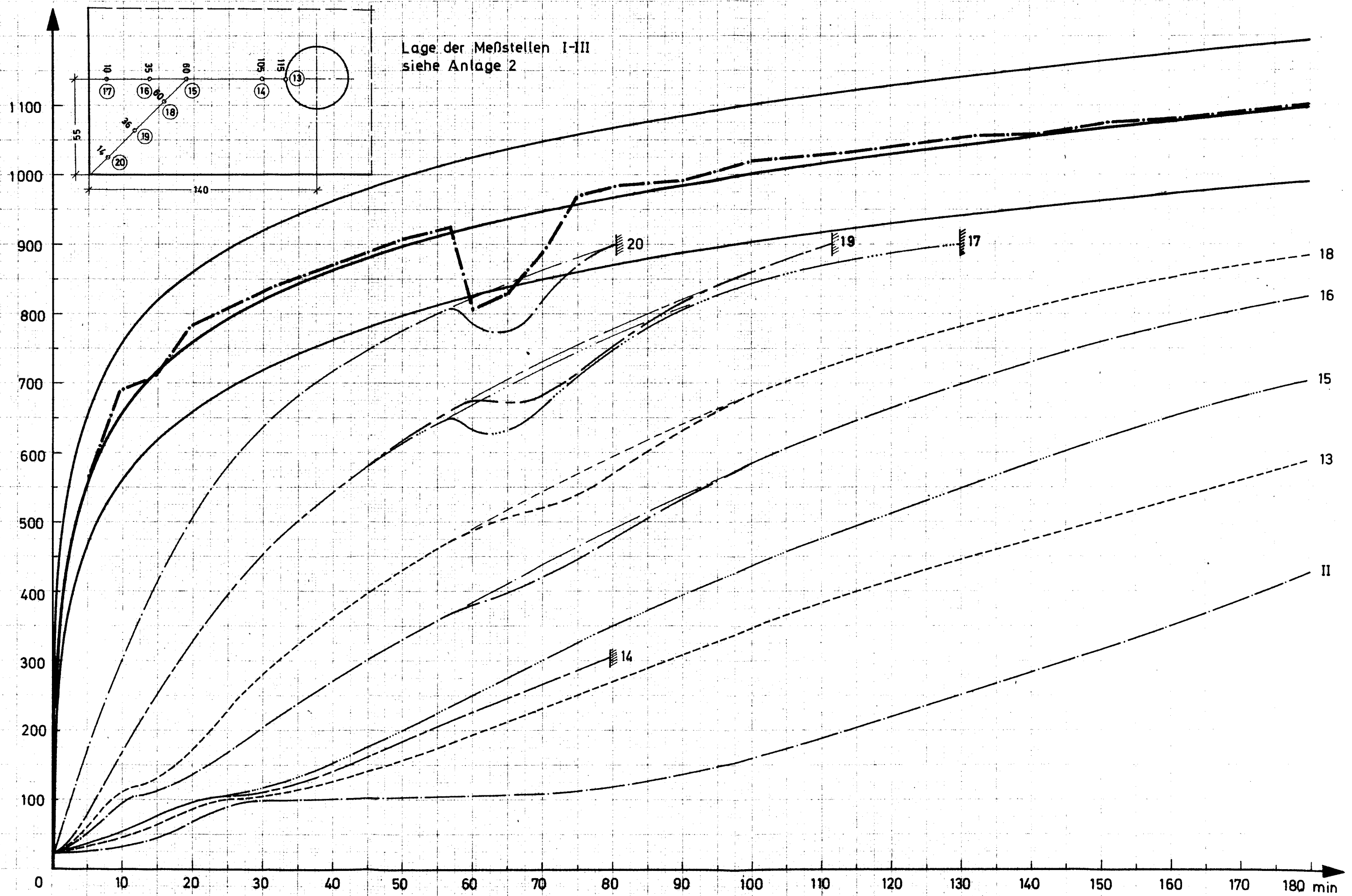


H.-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26  
Querschnitt 20/40

Anlage 11c



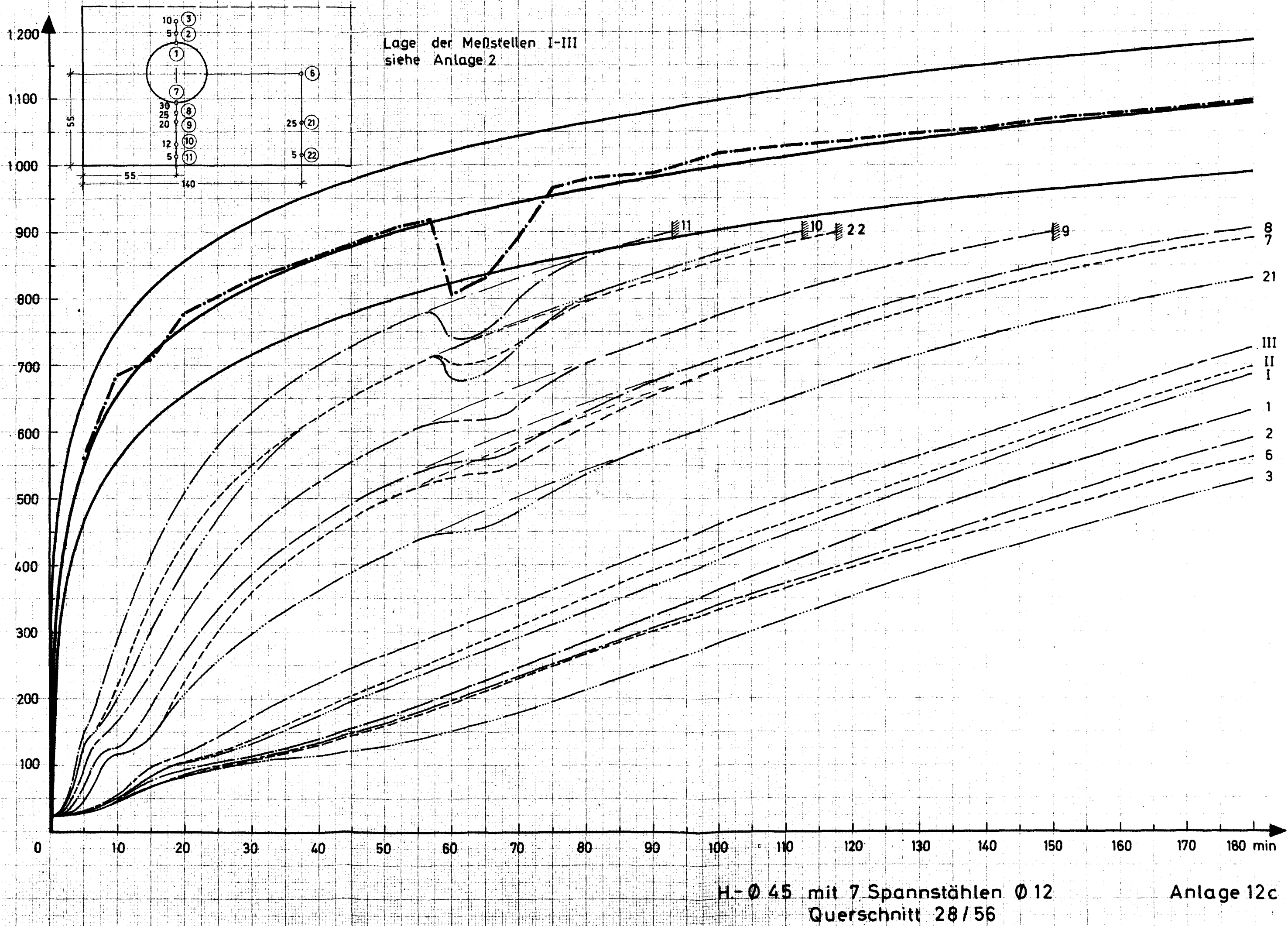


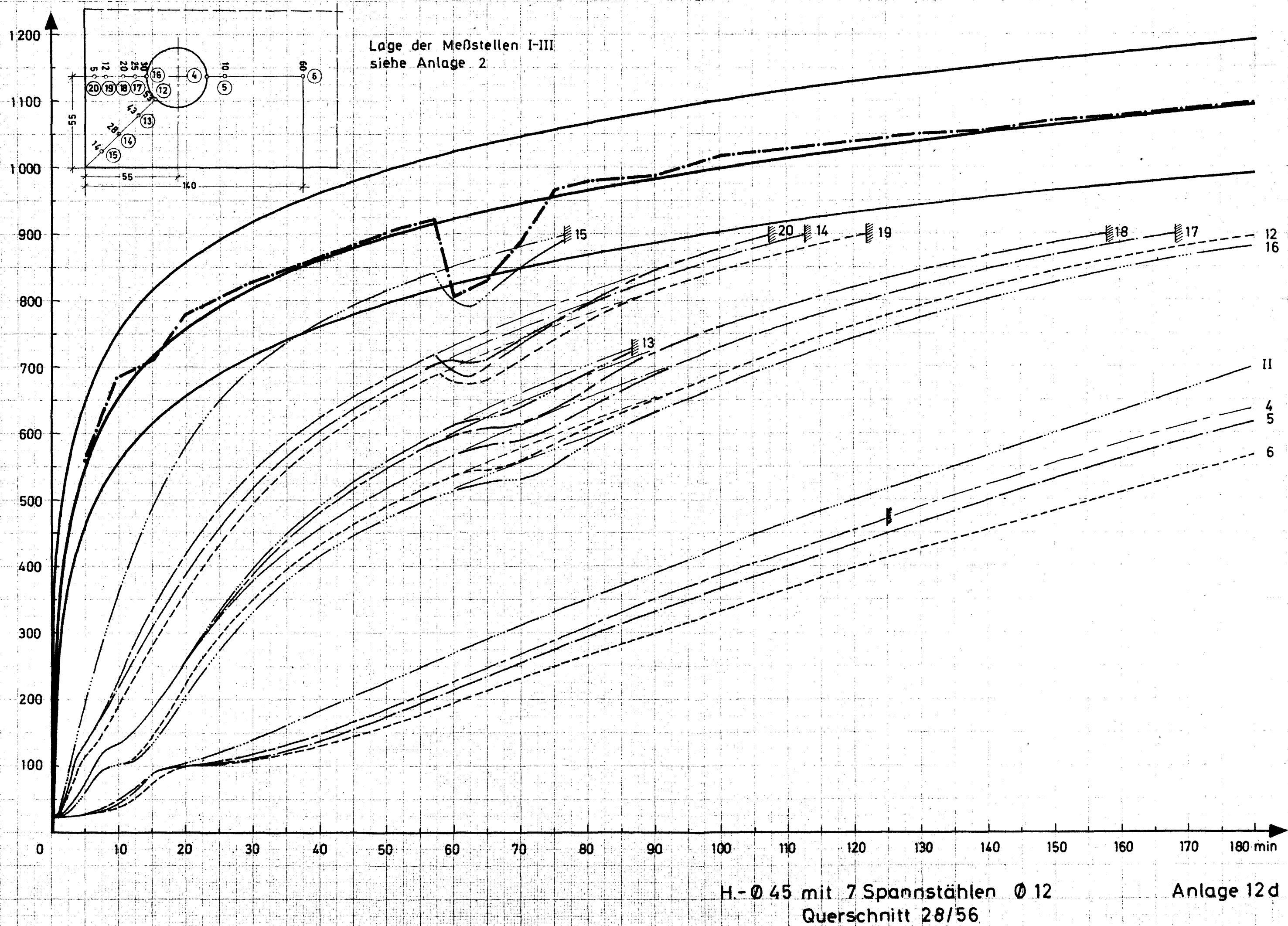


H.-Ø 45 mit 7 Spannstählen Ø 12  
Querschnitt 28 / 56

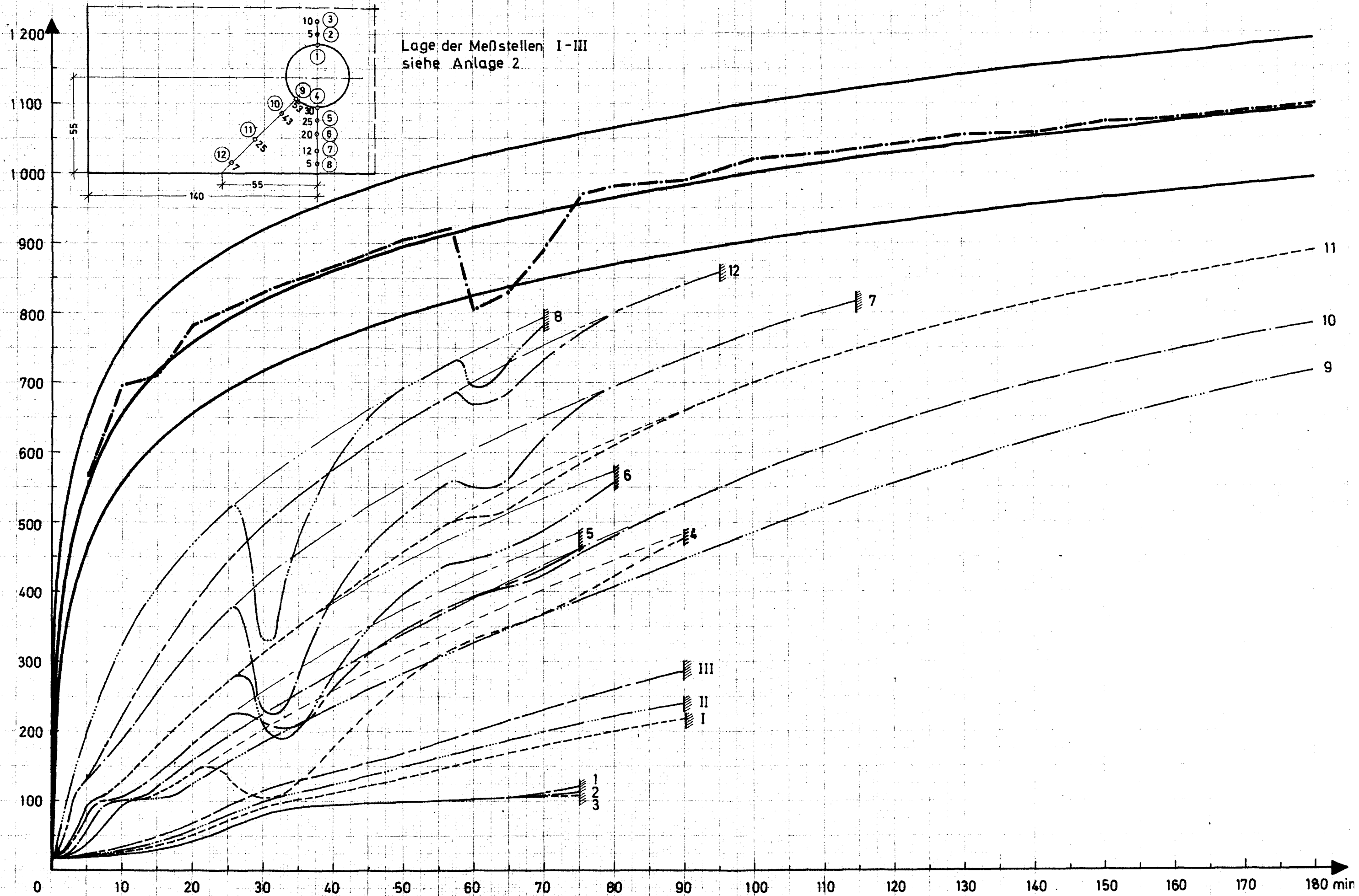
Anlage 12 b

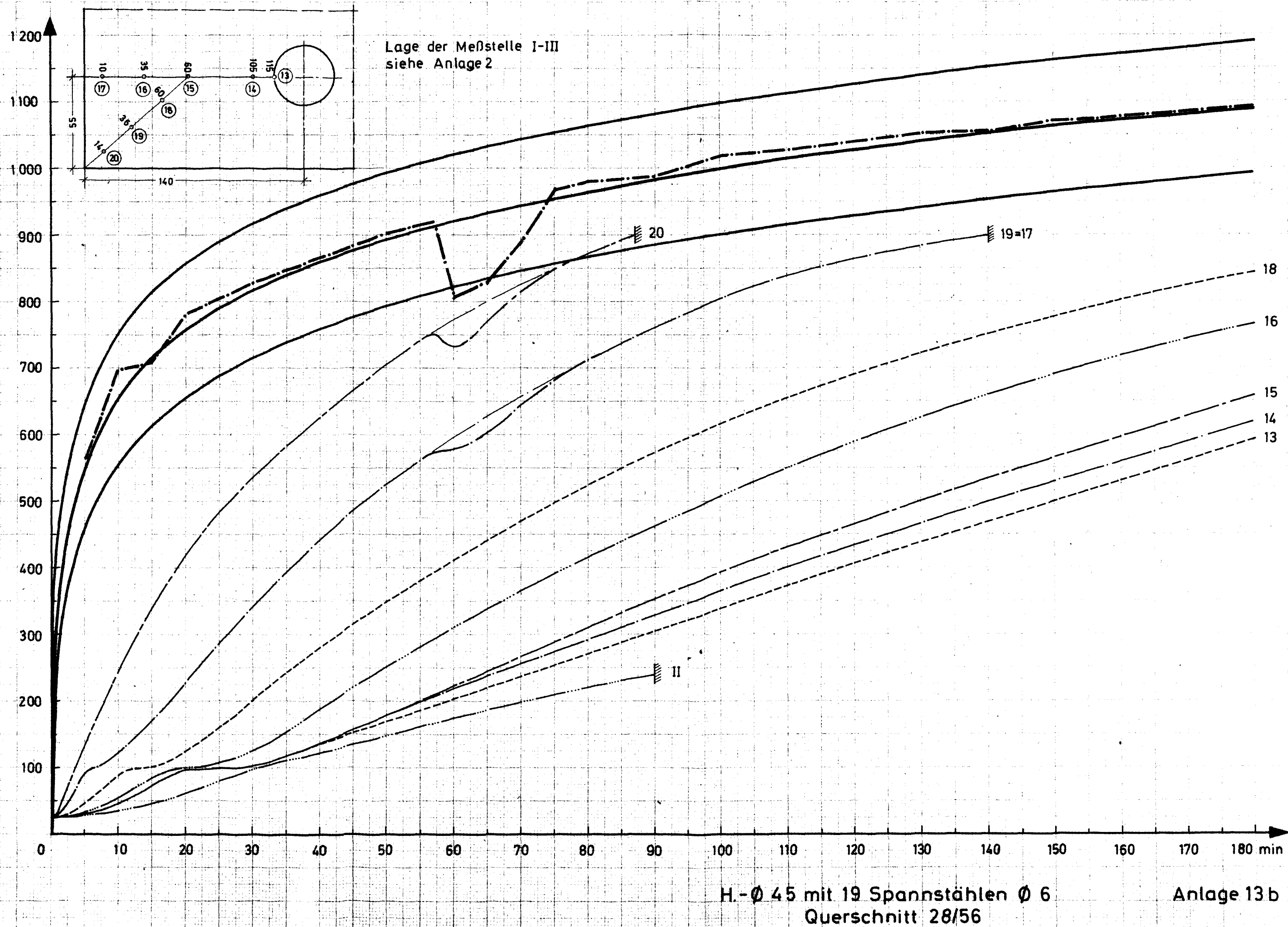


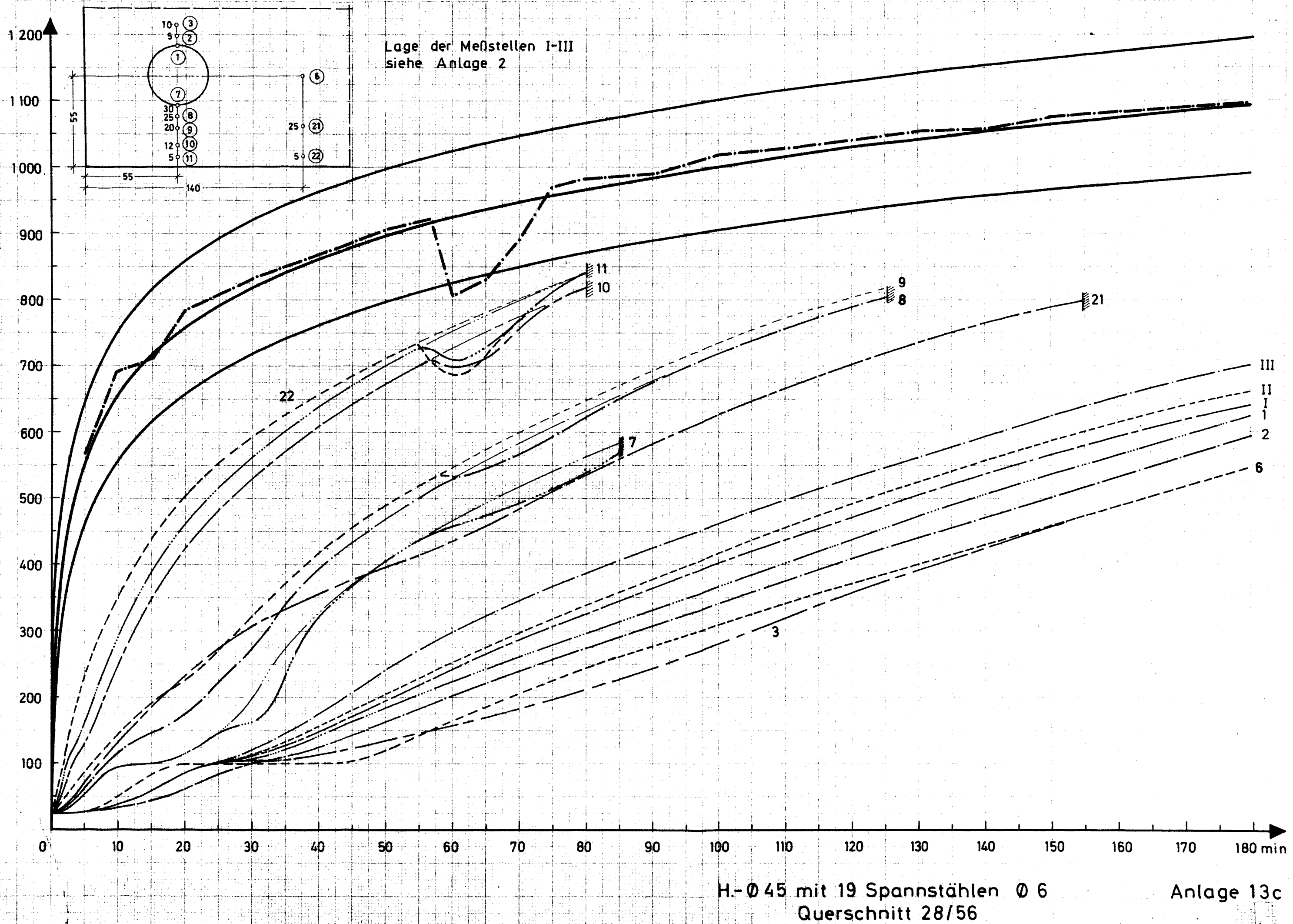


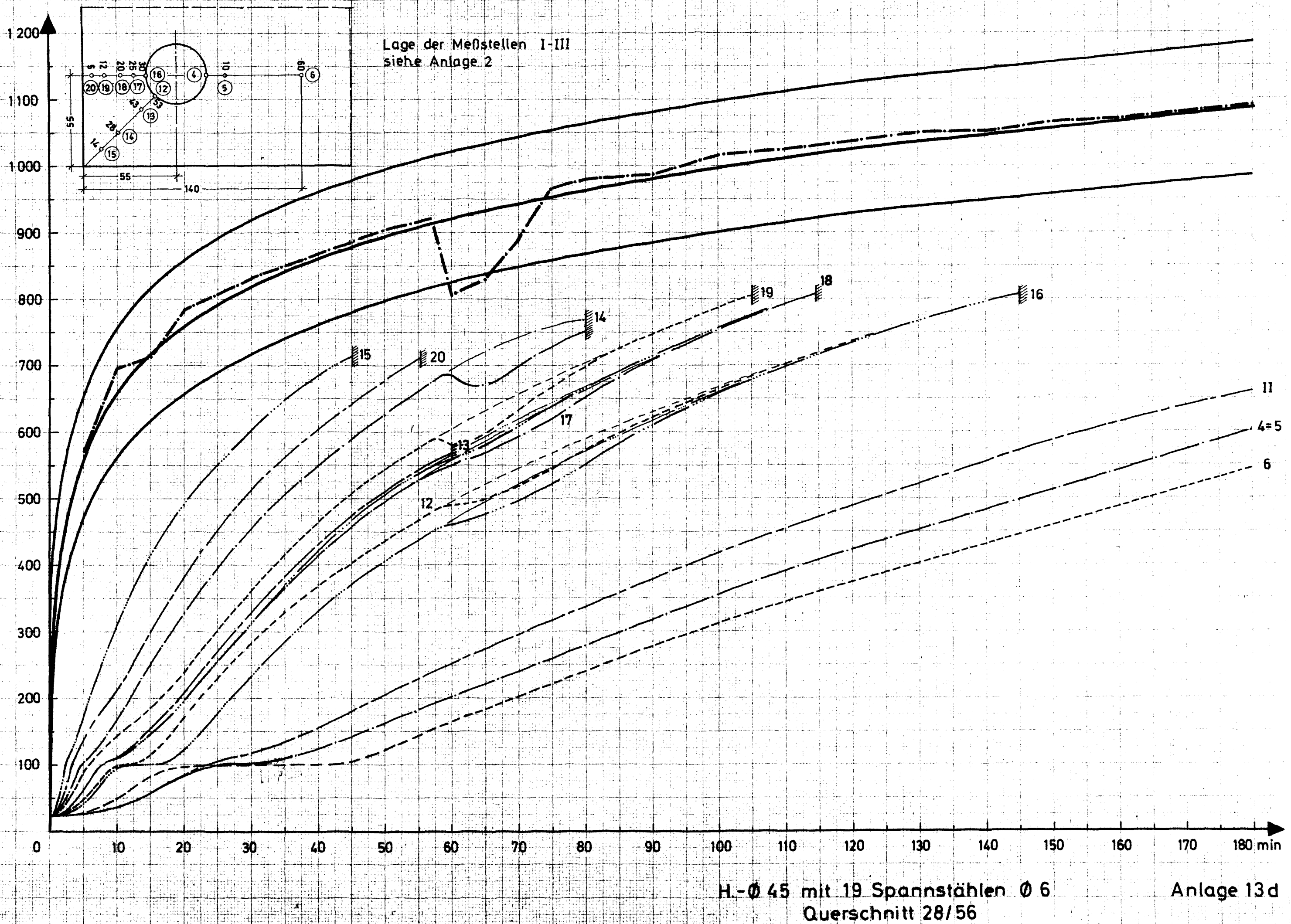




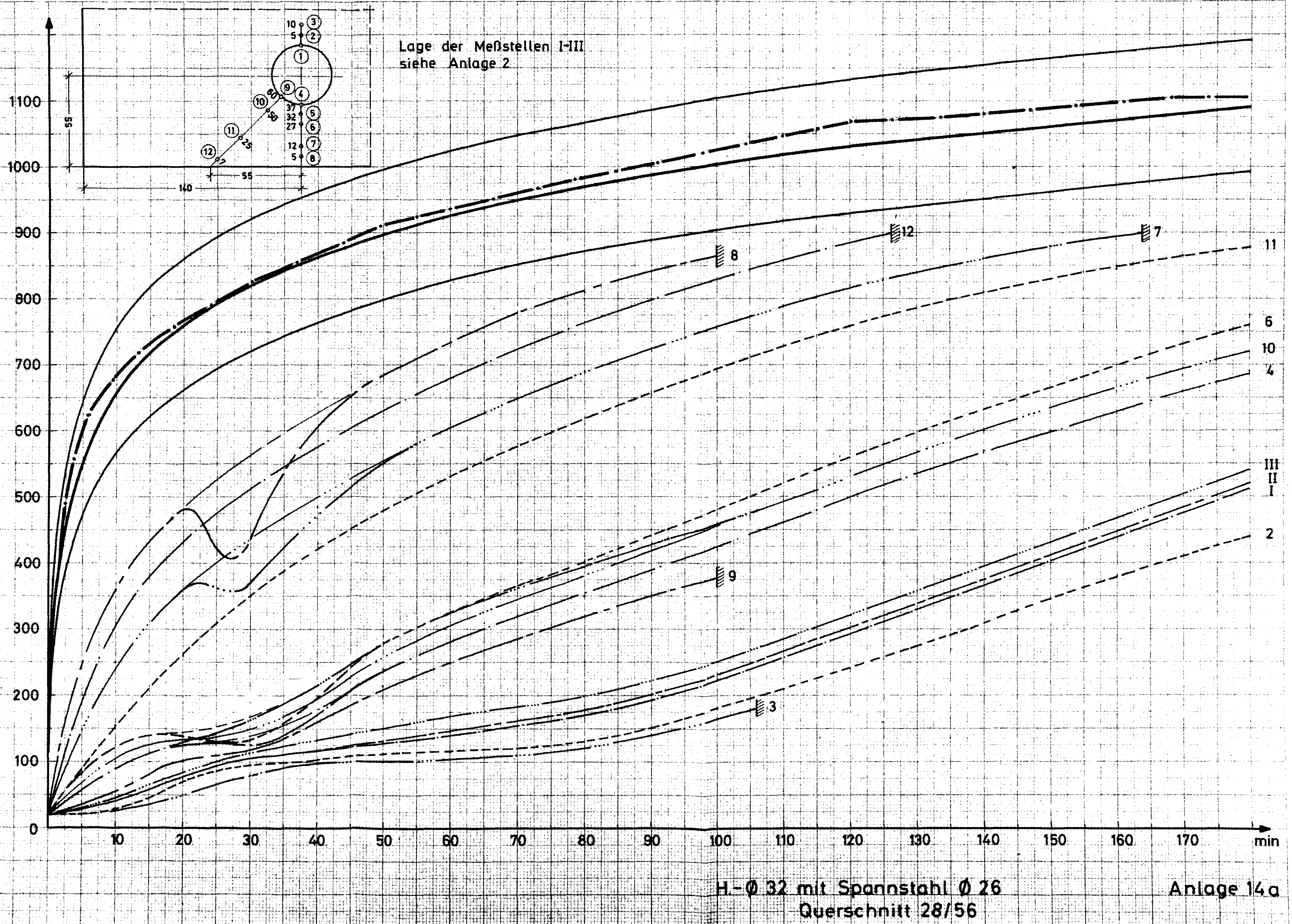


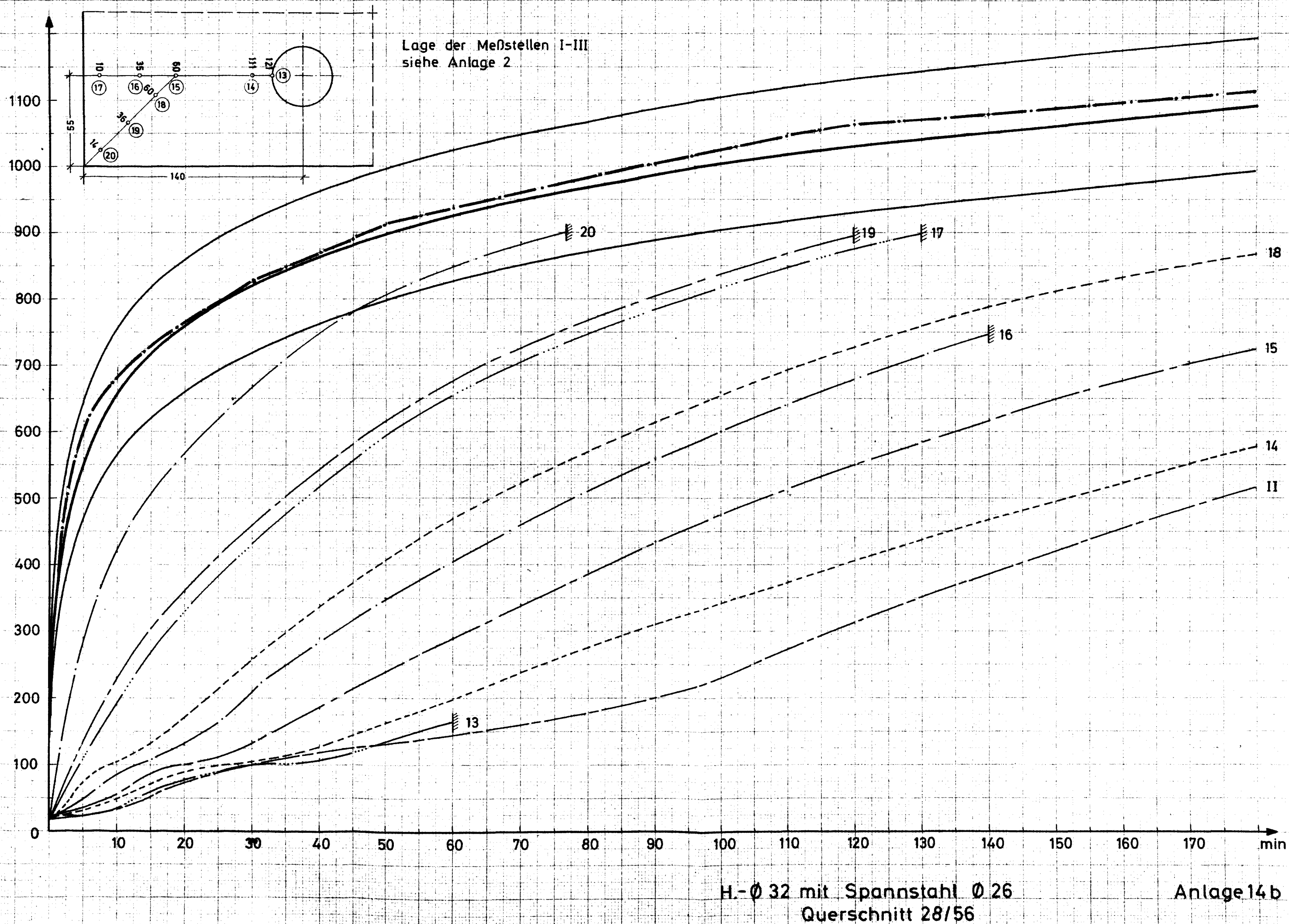


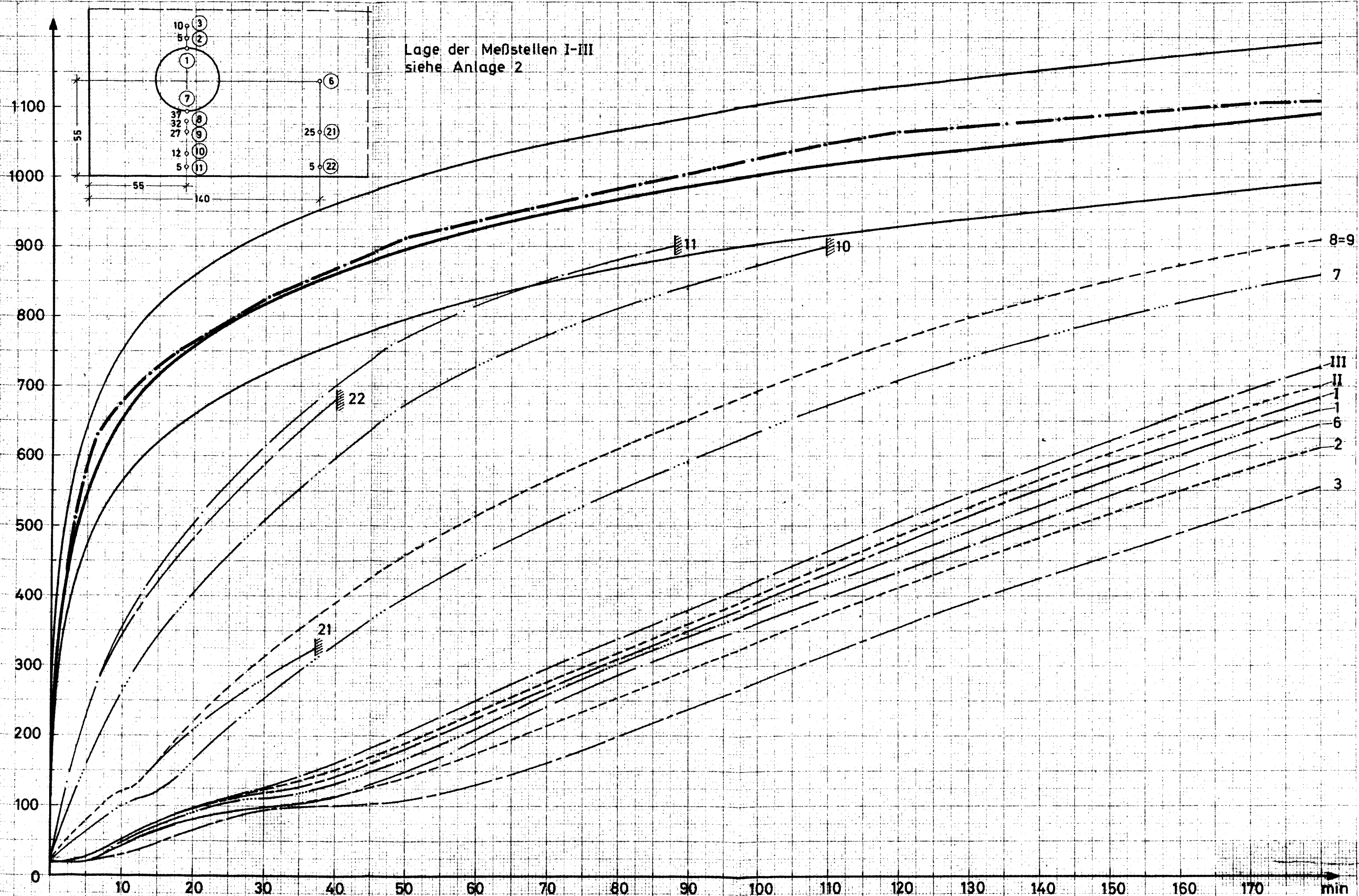








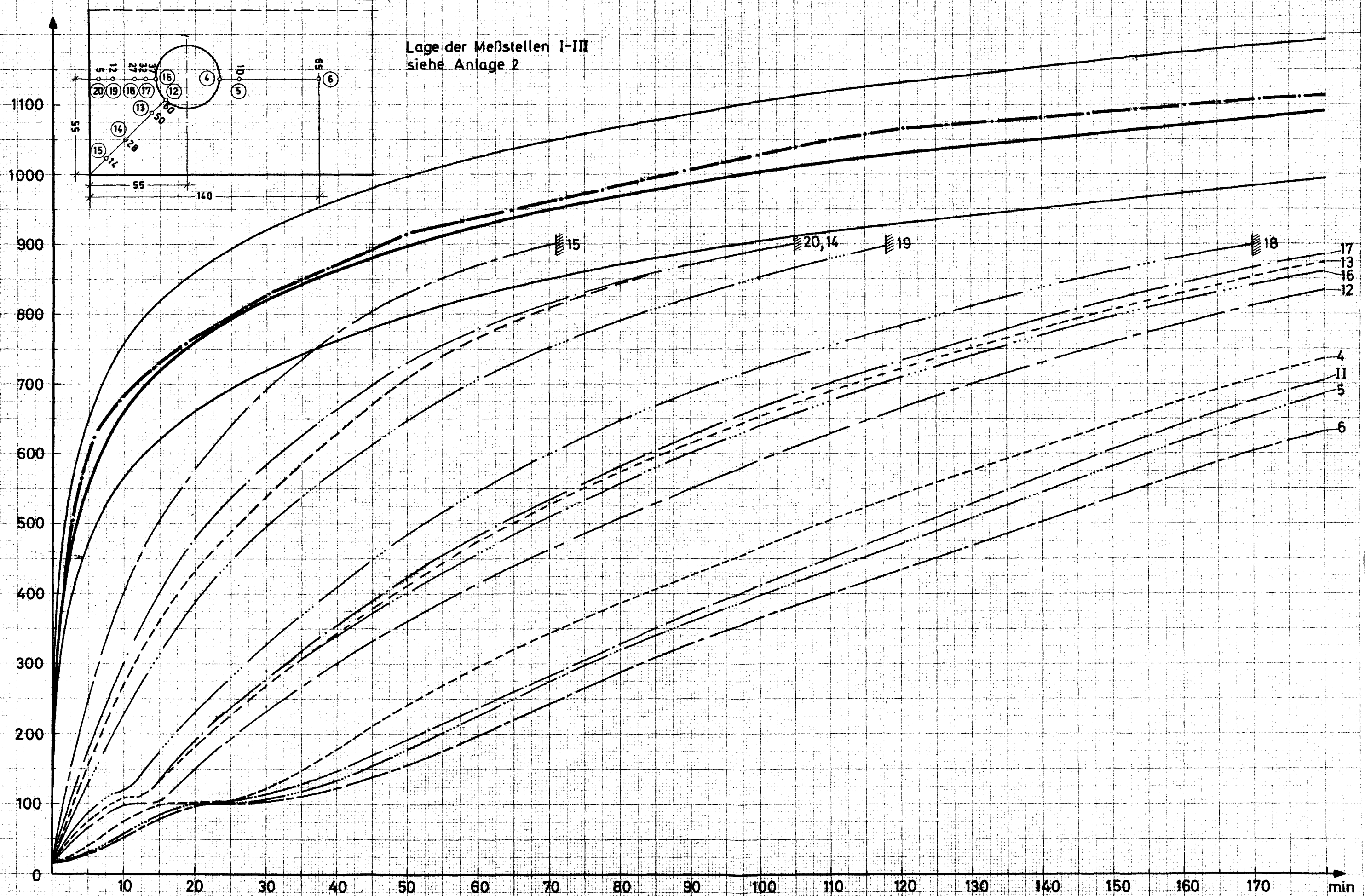




H.-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26  
Querschnitt 28/56

Anlage 14 c

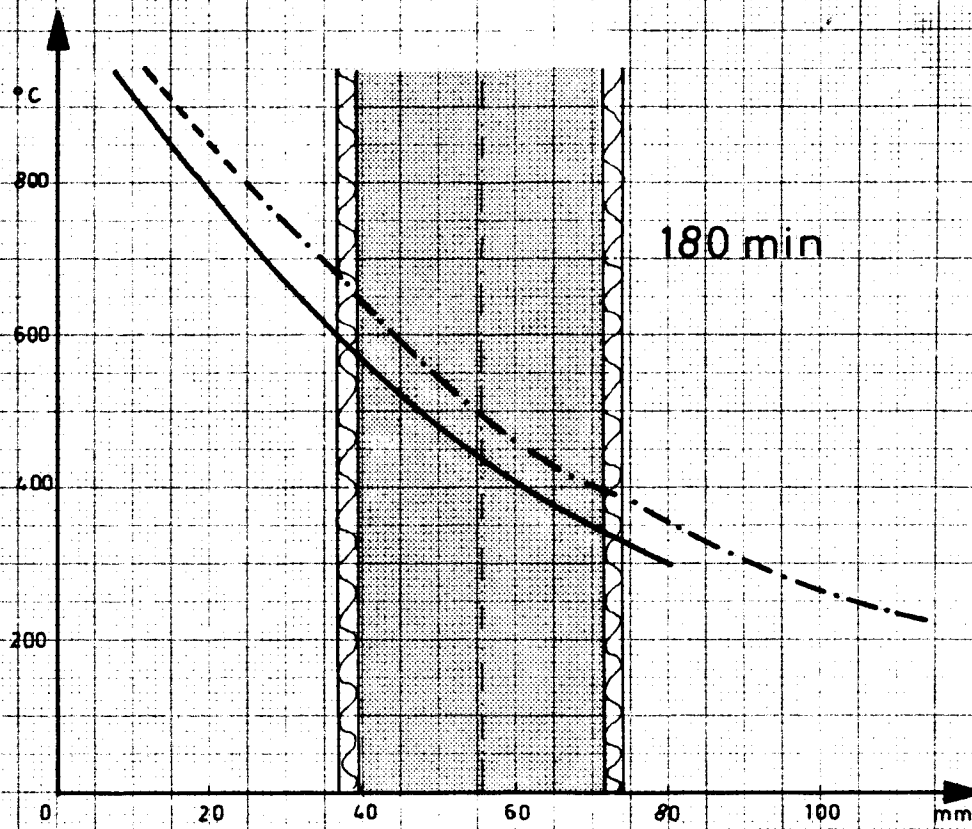
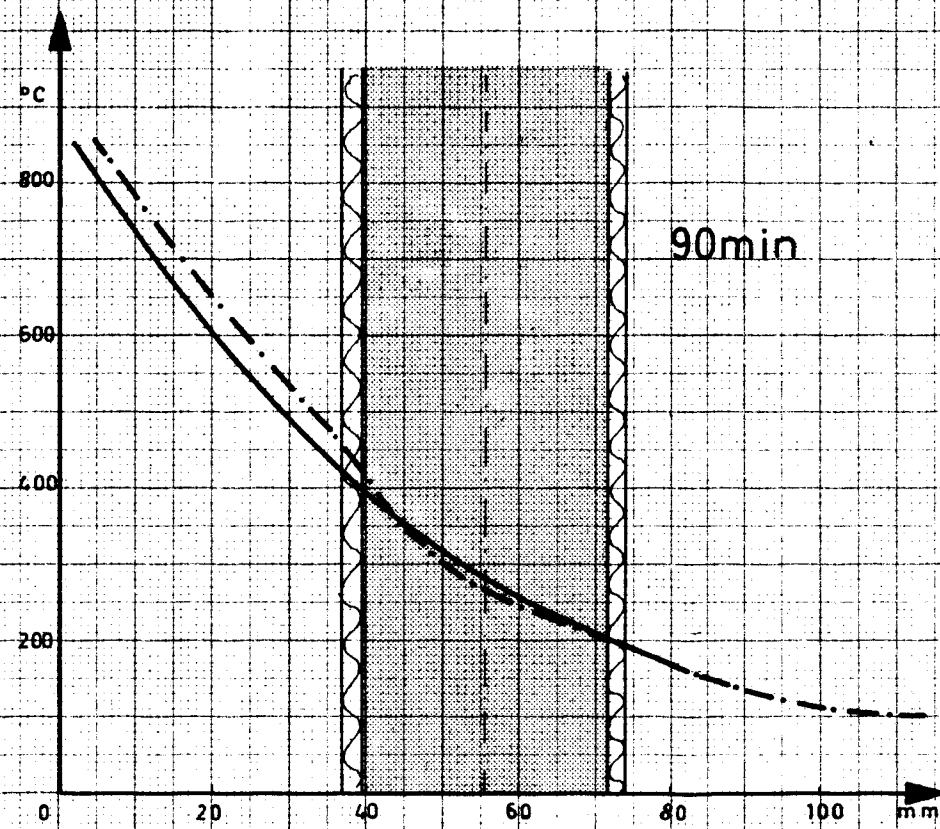
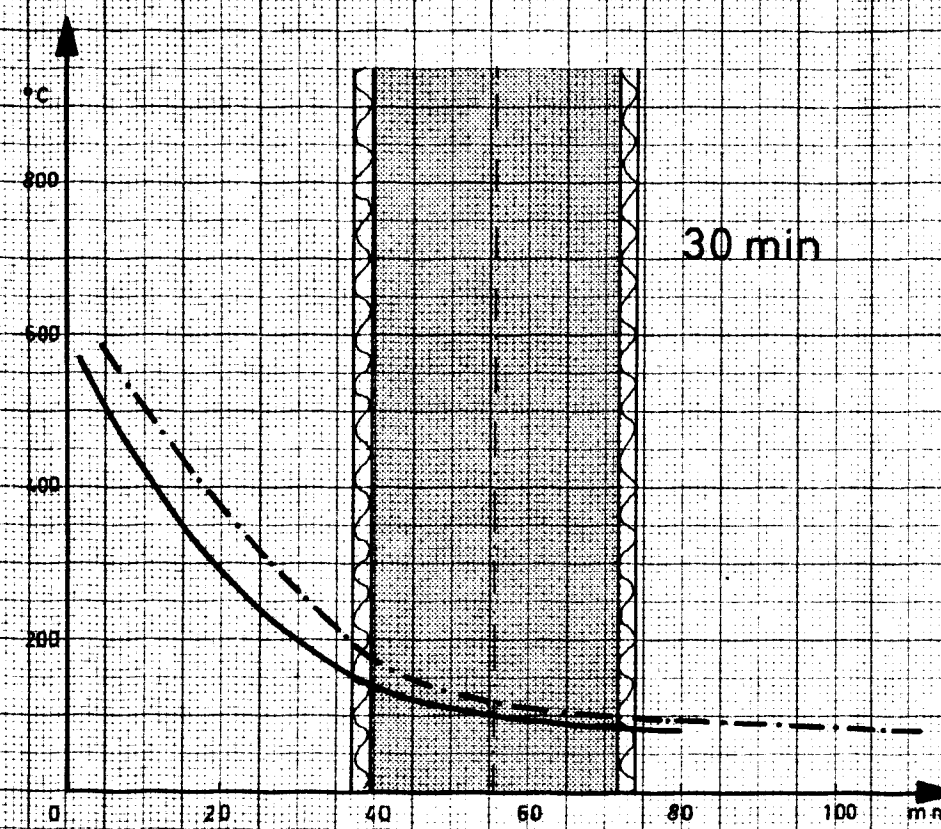




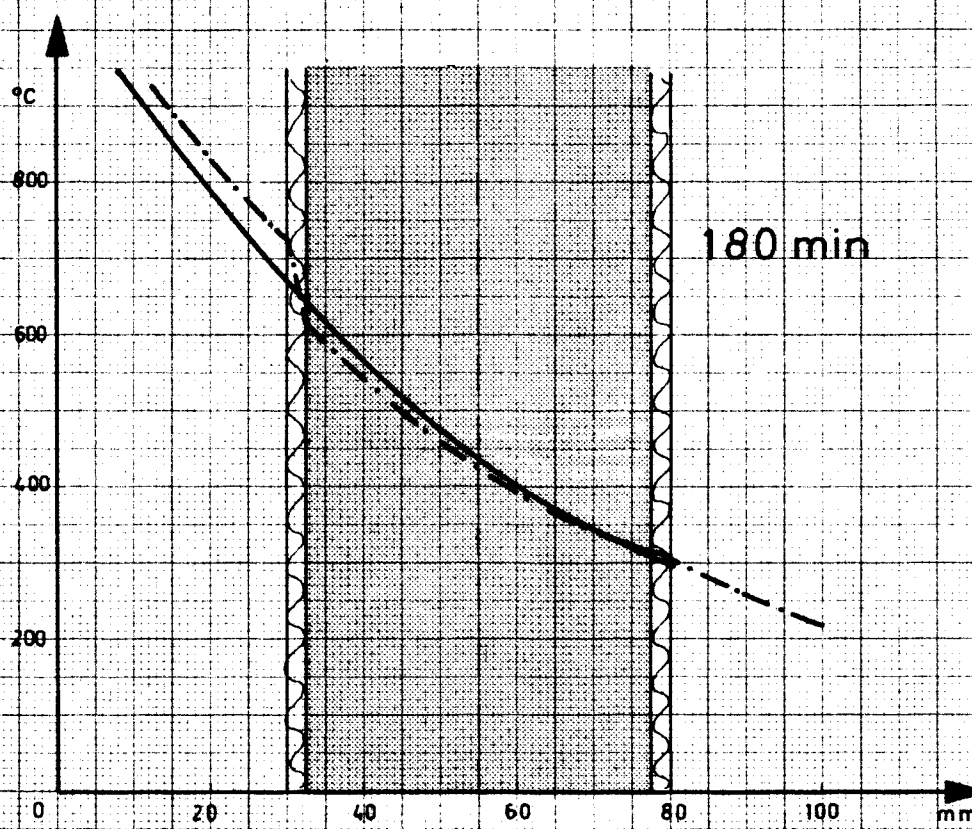
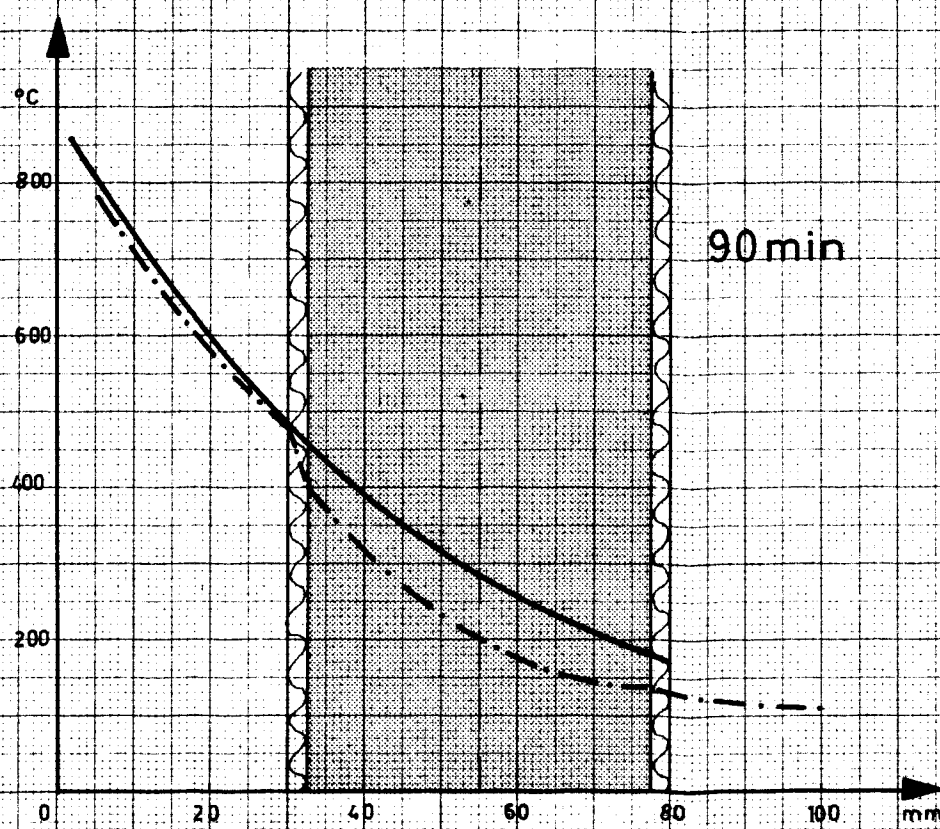
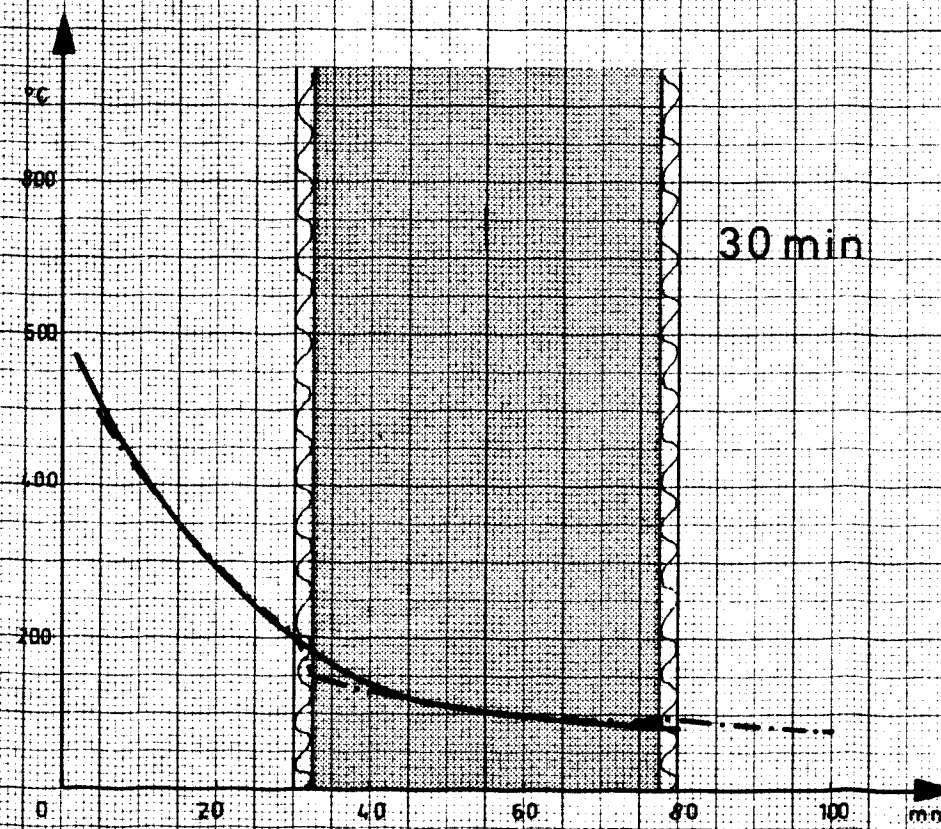
H-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26  
Querschnitt 28/56

Anlage 14d





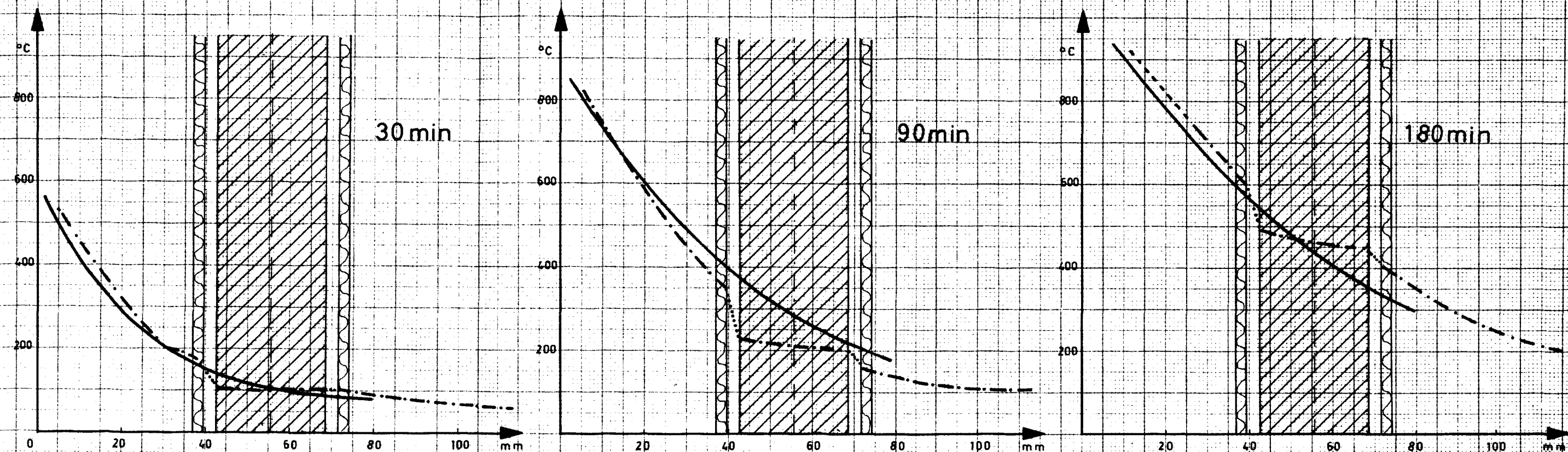
H.- Ø 32 nur ausgepreßt, Plattenquerschnitt



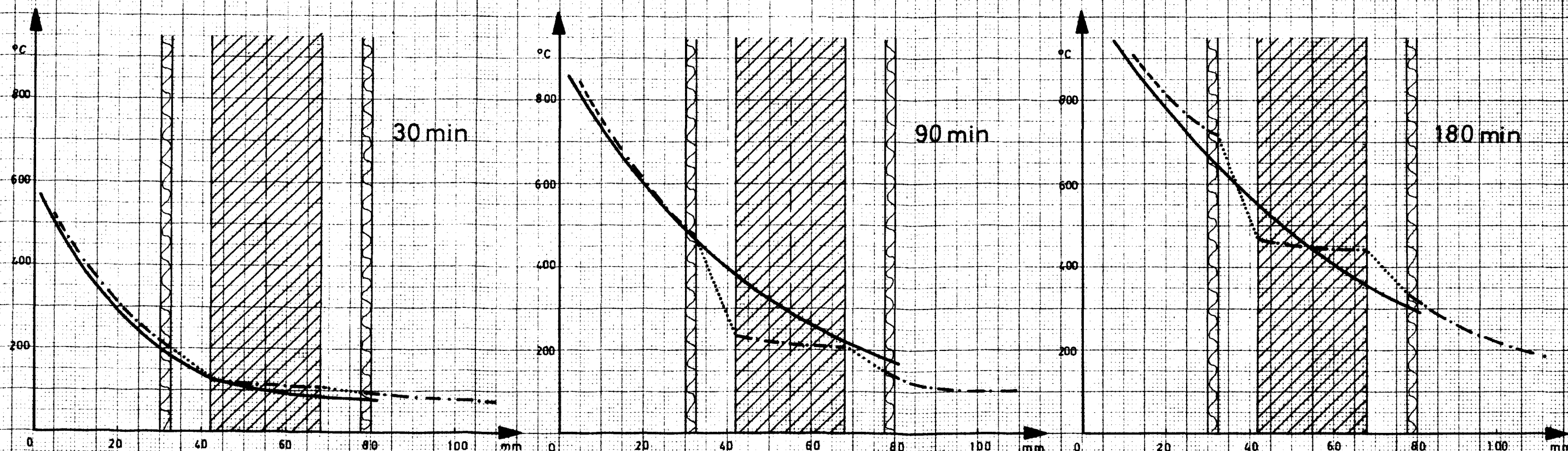
H.- Ø 45 nur ausgepreßt, Plattenquerschnitt

— Temperaturverlauf im ungestörten Betonquerschnitt

Anlage 15a



H-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26 , Plattenquerschnitt

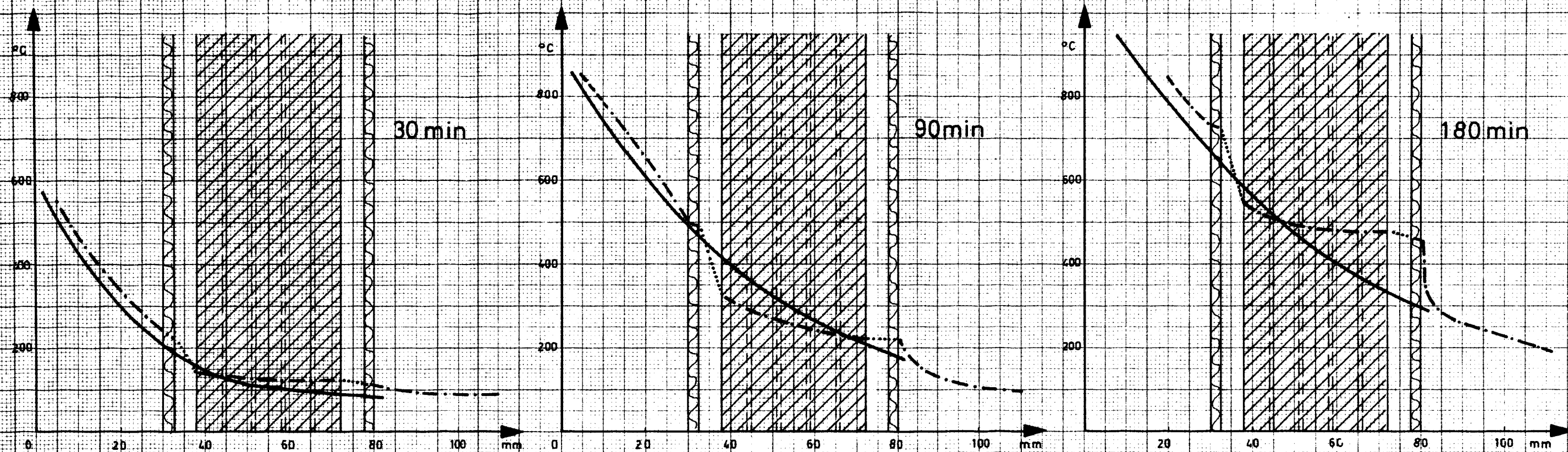


H-Ø 45 mit Spannstahl Ø 26 , Plattenquerschnitt

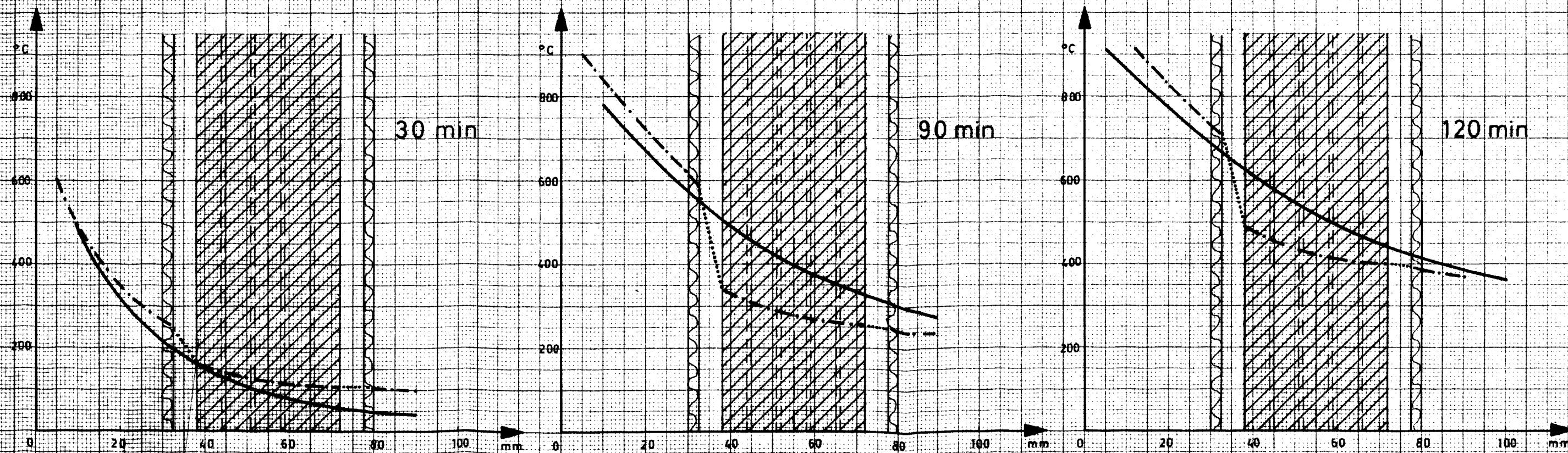
— Temperaturverlauf im ungestörten Betonquerschnitt

Anlage 15b





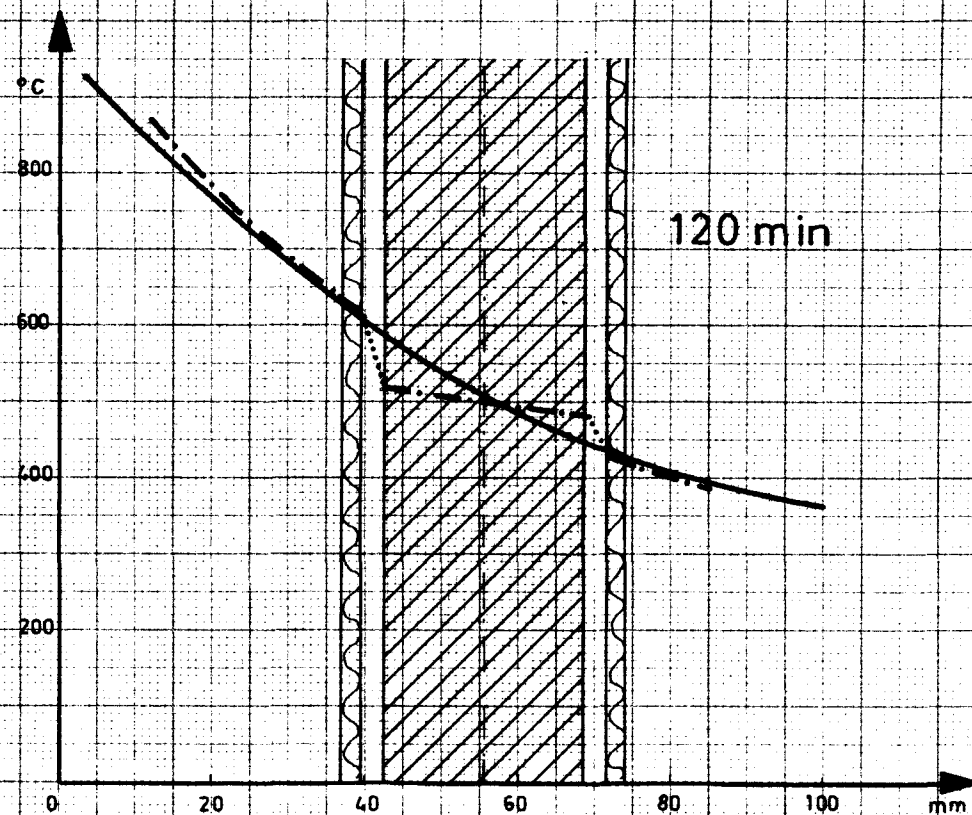
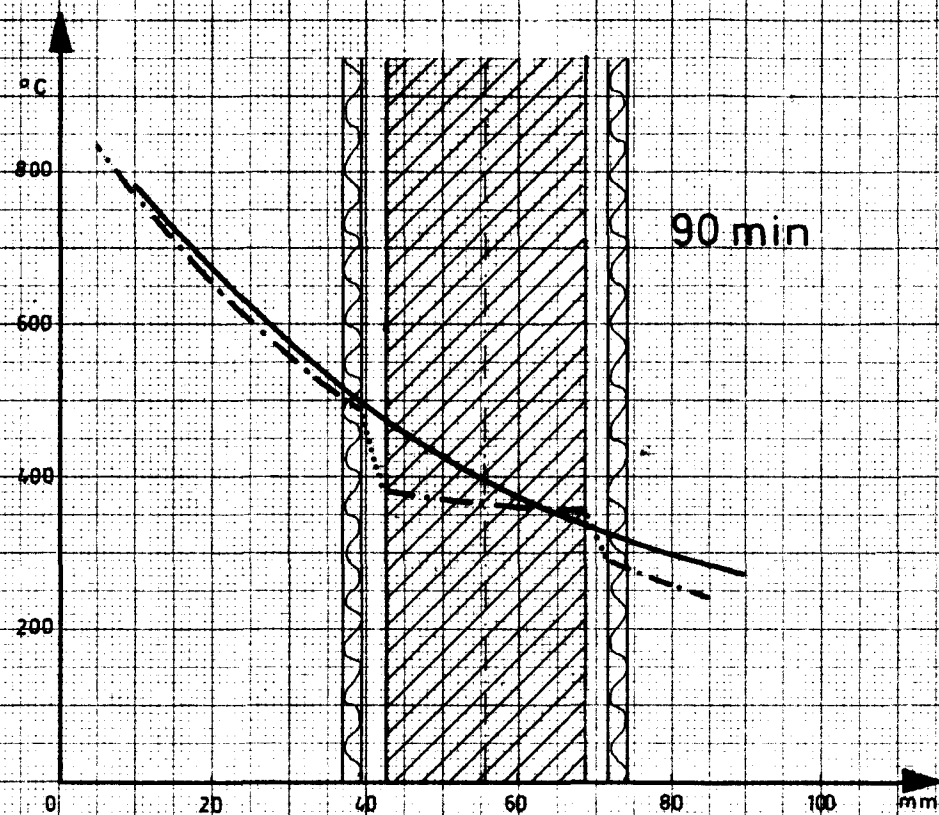
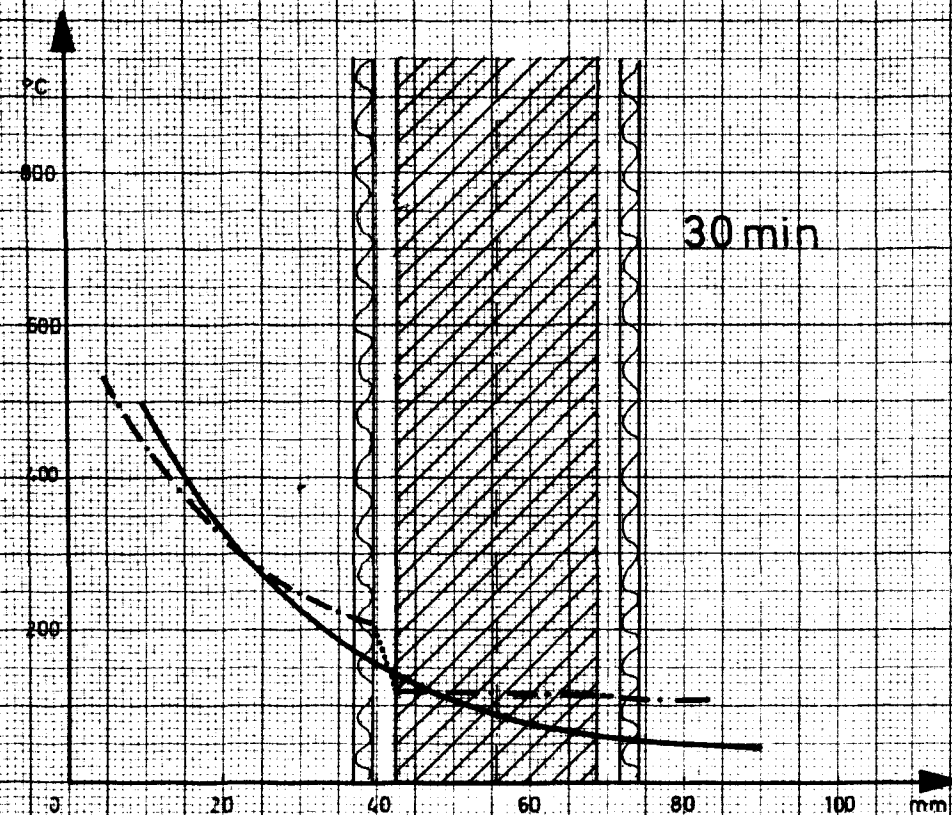
H.-Ø 45 mit 19 Spannstählen Ø 6 , Plattenquerschnitt



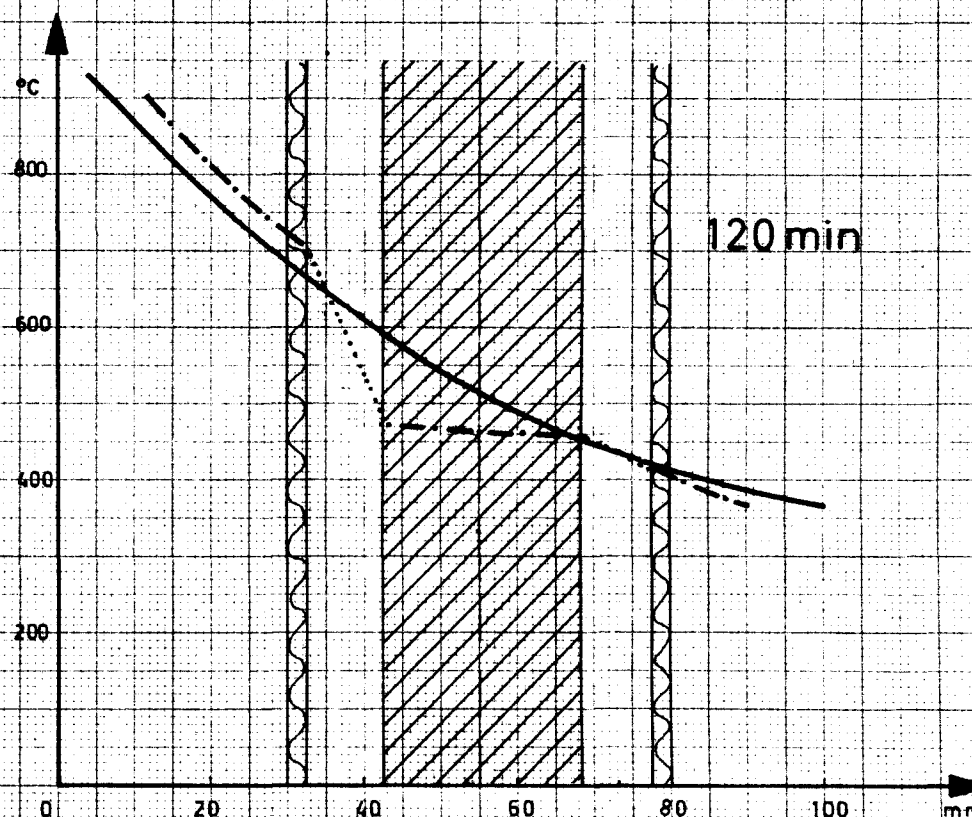
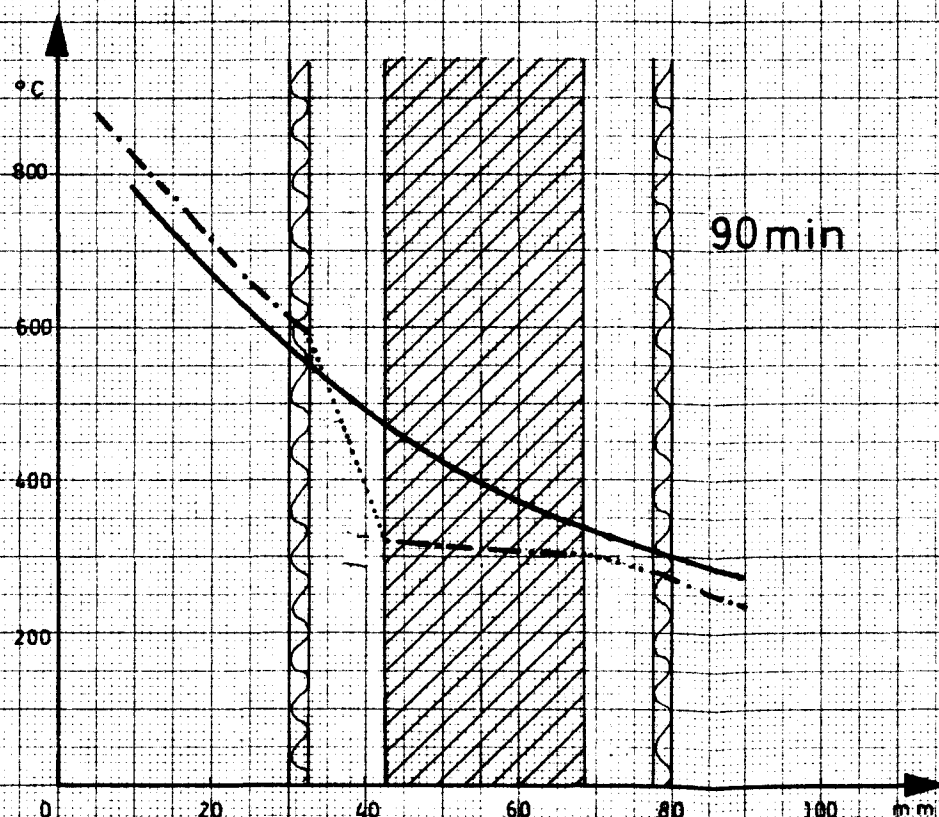
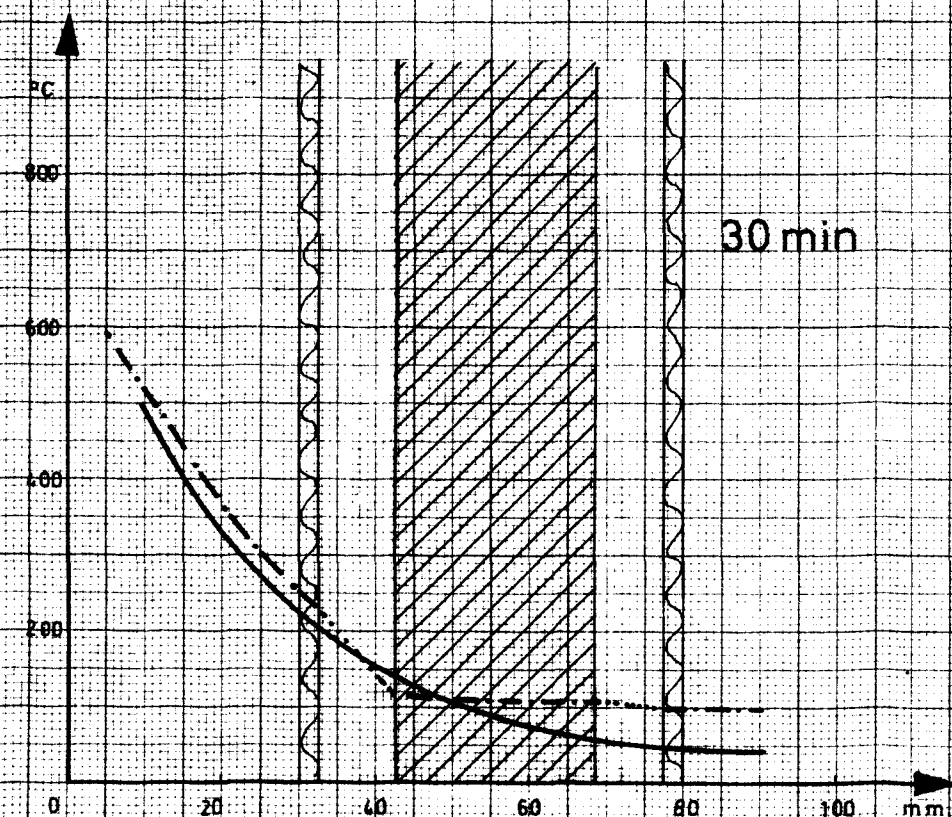
H.-Ø 45 mit 19 Spannstählen Ø 6 , Querschnitt 20/40

— Temperaturverlauf im ungestörten Betonquerschnitt

Anlage 15c



H-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26, Querschnitt 20/40

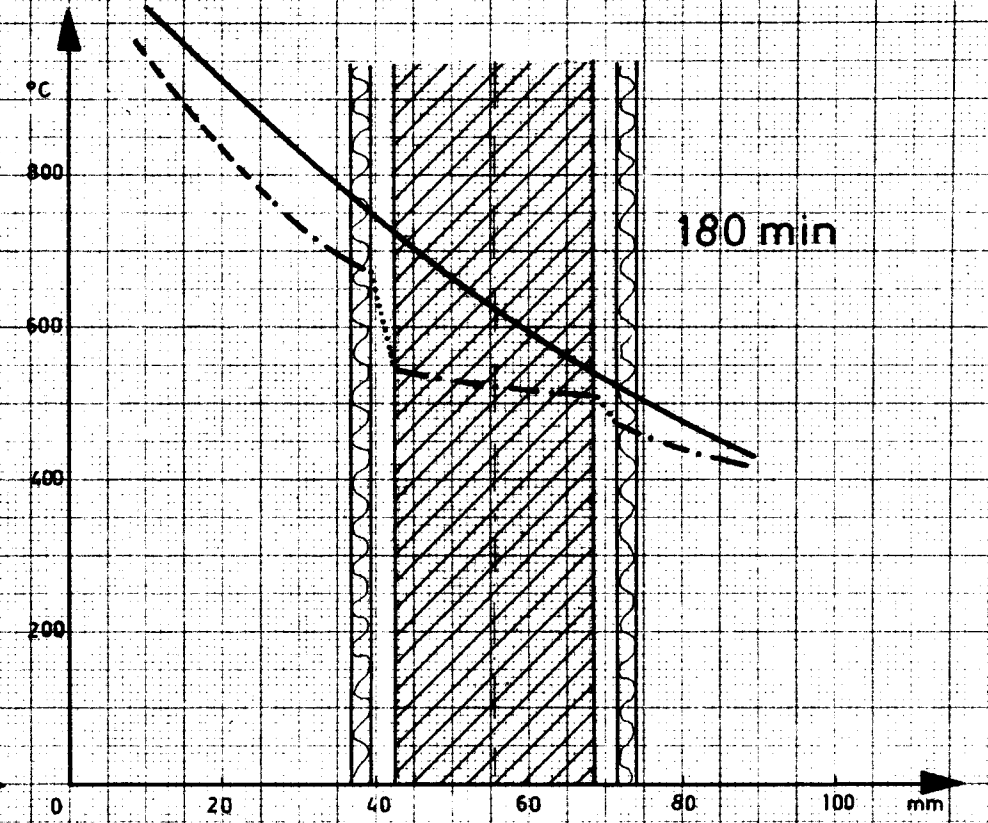
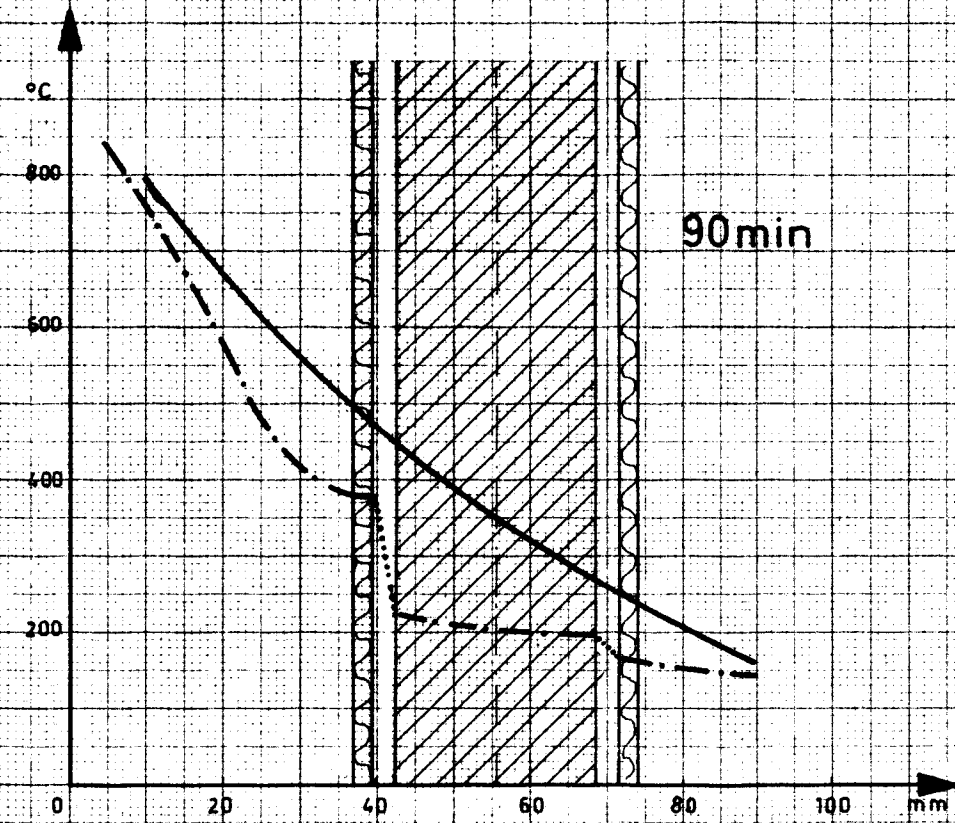
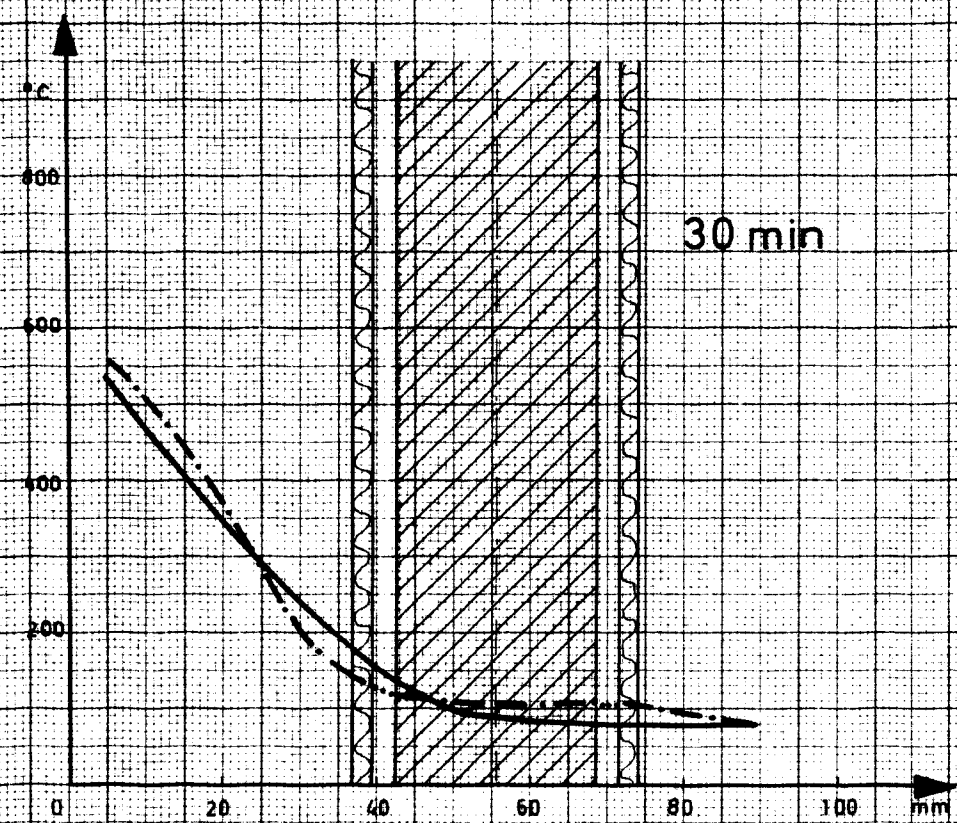


H-Ø 45 mit Spannstahl Ø 26, Querschnitt 20/40

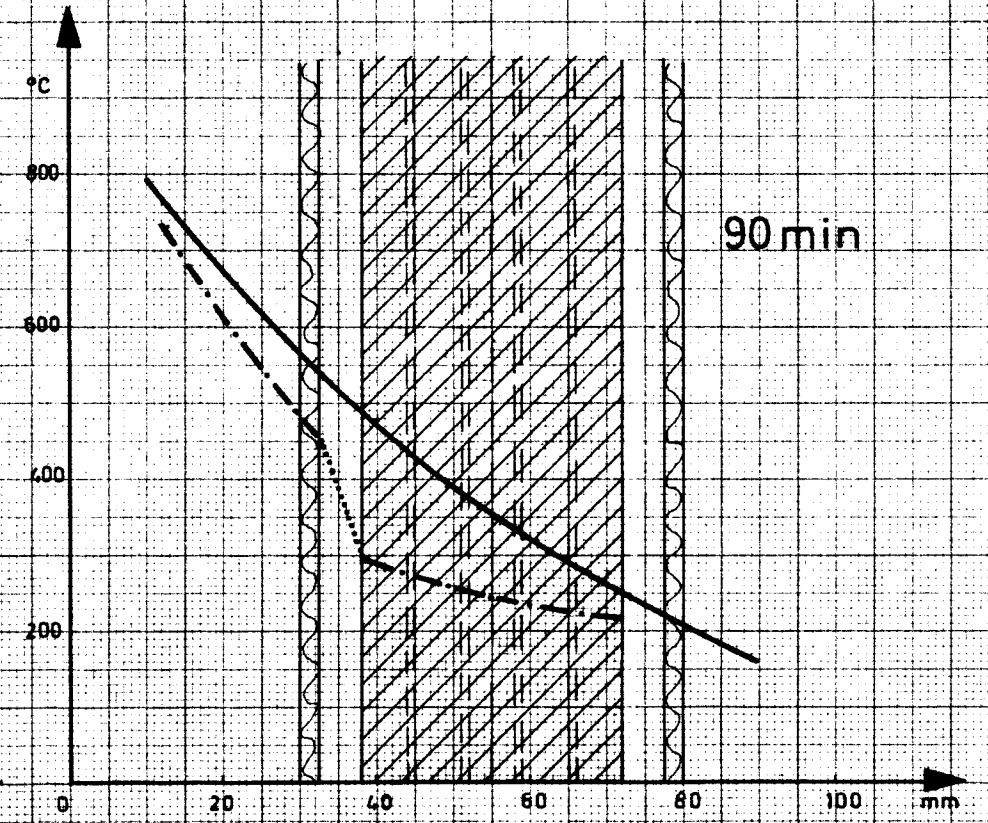
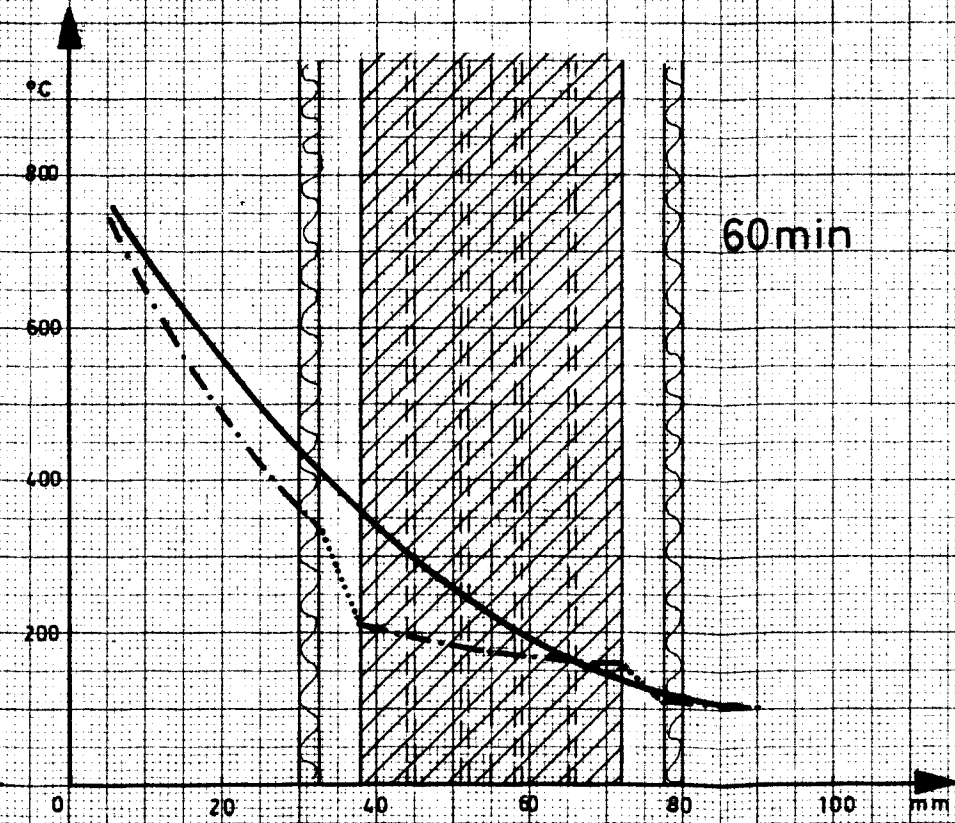
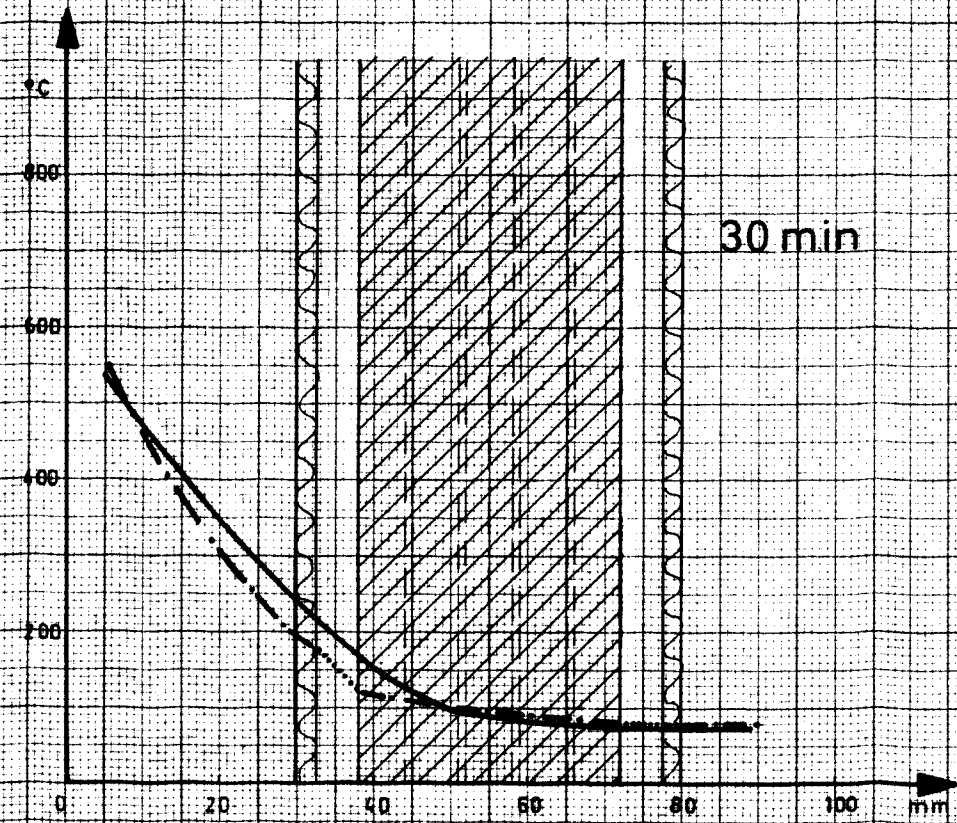
— Temperaturverlauf im ungestörten Betonquerschnitt

Anlage 15 d





H-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26, Querschnitt 28/56

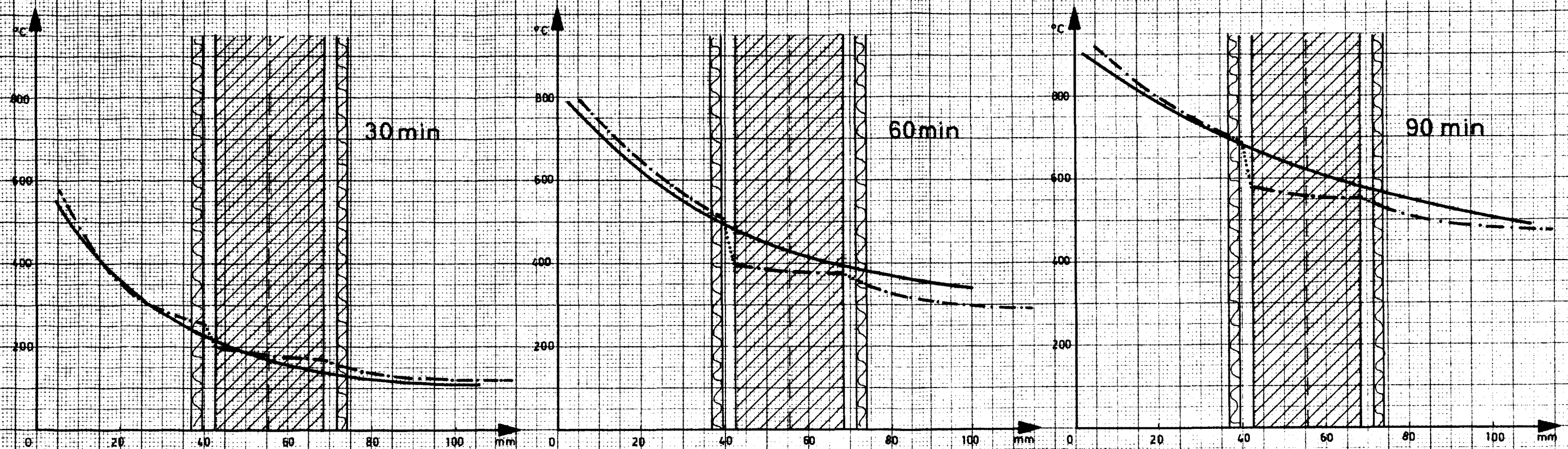


H-Ø 45 mit 19 Spannstählen Ø 6, Querschnitt 28/56

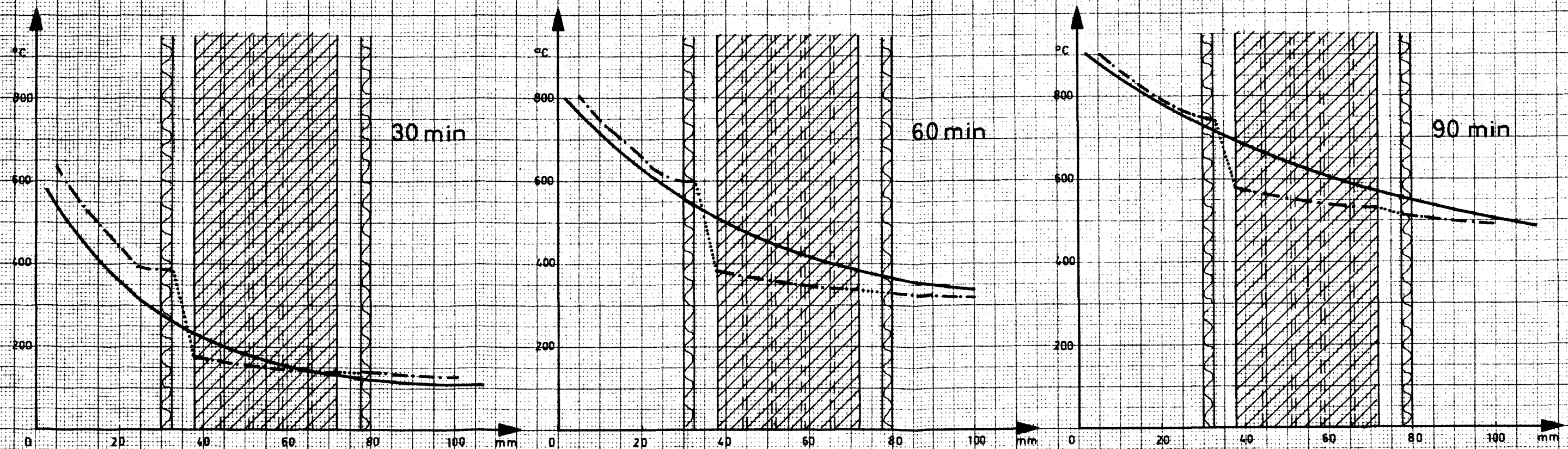
— Temperaturverlauf im ungestörten Betonquerschnitt

Anlage 15 e





H-Ø 32 mit Spannstahl Ø 26, Querschnitt 12/50



H-Ø 45 mit 19 Spannstählen Ø 6, Querschnitt 12/50

— Temperaturverlauf im ungestörten Betonquerschnitt

Anlage 15 f